



## ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN,  
ESPECIALIDAD EN SONIDO E IMAGEN

Título del proyecto:

### **APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS EN GRANDES SUPERFICIES COMERCIALES**

Eduardo Salinero Aso

Dr. Francisco Javier Falcone Lanas

Pamplona, 12 de noviembre de 2012



## ***Resumen***

Este proyecto se centra en la tecnología RFID y ZigBee aplicada en un ámbito comercial y pretende ofrecer tanto nociones básicas de la tecnología y sus aplicaciones, como un completo estudio radioeléctrico tanto teórico como práctico de diferentes entornos. Los resultados deterministas de la simulación se presentan con la ayuda de un código interno de lanzamiento de rayos 3D, indicando claramente la dependencia topológica y morfológica de los enlaces inalámbricos. La adopción de técnicas precisas de radiopropagación pueden ayudar al despliegue de soluciones eficientes y rentables aplicadas a la logística comercial de los supermercados.

## ***Abstract***

This project focuses on RFID and ZigBee technology applied to commercial environments and aims to provide both basic knowledge of the technology and its application in this field as well as a comprehensive radio frequency study both theoretical and practical in different environments. Deterministic simulation results are presented with the aid of an in-house 3D ray launching code, clearly stating the topological and morphological dependence of the wireless link. The adoption of precise radioplanning techniques can aid in the deployment of efficient and cost effective wireless solutions applied to commercial logistics in supermarkets.

*Gracias a él, a ella, a ellos...*



# INDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>9</b>
1.1. CONTEXTO DEL PROYECTO .....	9
1.2. OBJETIVOS .....	10
1.3. HERRAMIENTAS .....	10
1.3.1. Hardware .....	10
1.3.1. Software .....	11
1.3.1.1. Matlab .....	11
1.3.1.2. Sigmaplot .....	12
<b>2. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>13</b>
2.1. RADIO FRECUENCIA .....	13
2.1.1. Ondas electromagnéticas .....	13
2.1.1.1. Polarización de una onda electromagnética .....	14
2.1.2 Radio Propagación .....	15
2.1.2.1. Reflexión y refracción .....	15
2.1.2.2. Difracción .....	17
2.1.2.3. Propagación por onda directa .....	17
2.1.2.4. Propagación por onda de superficie .....	18
2.1.2.5. Propagación troposférica .....	18
2.1.2.6. Propagación ionosférica .....	18
2.1.2.7. Propagación por el espacio .....	18
2.1.3. Radiocomunicación .....	19
2.1.3.1. Distorsión .....	20
2.1.3.2. Ruido e interferencias .....	20
2.1.3.3. Modos de explotación .....	20
2.1.3.3.1. Simplex .....	20
2.1.3.3.2. Dúplex .....	20
2.1.3.3.3. Semidúplex .....	21
2.1.3.4. Frecuencias radioeléctricas .....	21
2.2. TECNOLOGÍA RFID .....	21
2.2.1. Introducción .....	21
2.2.2. Historia del RFID .....	22
2.2.3. ¿Qué es la tecnología RFID? .....	23
2.2.3.1. Sistemas Auto-Id .....	23
2.2.3.1.1. Código de barras .....	23
2.2.3.1.2. Reconocimiento óptico de caracteres .....	24
2.2.3.1.3. Sistemas biométricos .....	25
2.2.3.1.4. Tarjetas inteligentes .....	25
2.2.4. Ventajas del uso de la tecnología RFID .....	26
2.2.4. Fundamentos básicos de los sistemas RFID .....	26
2.2.5. Clasificación de transpondedores RFID .....	27
2.2.5.1. Transpondedor de 1 bit .....	28
2.2.5.1.1. Radio frecuencia .....	28
2.2.5.1.2. Microondas .....	28
2.2.5.1.3. Divisor de frecuencia .....	29
2.2.5.1.4. Electromagnéticos .....	29
2.2.5.1.5. Acústico-magnéticos .....	30
2.2.5.2. Transpondedor de n-bit .....	31
2.2.5.2.1. Sistemas Half y Full dúplex .....	31
2.2.5.2.2. -Sistemas secuenciales .....	33
2.2.5.-Lectores .....	35
2.2.5.1. Modulo de radiofrecuencia .....	36
2.2.5.2. Unidad de control .....	36
2.2.5.3. Antena emisora .....	37
2.2.6.-Bandas de frecuencia RFID .....	39
2.2.6.1.-Sistemas de baja frecuencia (LF) .....	40
2.2.6.2.-Sistemas de alta frecuencia (HF) .....	40
2.2.6.3.-Sistemas de ultra alta frecuencia (UHF) .....	40
2.2.6.4.-Sistemas de microondas .....	41
<b>2.3. TECNOLOGÍA ZIGBEE .....</b>	<b>41</b>

2.3.1. Definición de ZigBee .....	41
2.3.2. Descripción general.....	43
2.3.3. Tipos de dispositivos.....	43
2.3.4. Arquitectura.....	44
2.3.5. Empaquetamiento y Direccionamiento .....	45
2.3.6. Topologías .....	47
2.3.6.1. Topología en estrella.....	48
2.3.6.2. Topología en árbol.....	49
2.3.6.3. Topología igual a igual (peer to peer) .....	50
2.3.6.4. Topología en malla .....	51
<b>3. ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO EN UN ENTORNO COMERCIAL.....</b>	<b>53</b>
3.1. RESULTADOS PRELIMINARES ANALÍTICOS .....	53
3.1.1. RFID.....	53
3.1.1.1. Primera aproximación.....	53
3.1.1.2. Segunda aproximación.....	55
3.1.2. ZigBee .....	59
3.2. MÉTODO DETERMINISTA: TRAZADO DE RAYOS .....	61
3.2.1. Descripción del escenario .....	62
3.2.2. Trazado de rayos .....	63
3.2.3. Cálculo de la posición de la antena.....	65
3.2.2.1. Posición antena centro .....	65
3.2.2.1.1. RFID .....	66
3.2.2.1.2. ZigBee .....	68
3.2.2.2. Posición antena esquina.....	70
3.2.2.2.1. RFID .....	71
3.2.2.2.2. ZigBee .....	73
3.2.3. Mejor posición antena .....	75
3.4. ESCENARIO GRANDE .....	78
3.5. INTRODUCCIÓN DE ELEMENTOS EN LAS ESTANTERÍAS.....	82
3.5.1. Objetos de Cartón.....	83
3.5.1.1. Estantería 1 .....	84
3.5.1.2. Estantería 2 .....	85
3.5.2. Objetos de Cristal.....	86
3.5.2.1. Estantería 1 .....	87
3.5.2.2. Estantería 2 .....	88
3.5.3. Objetos de Metal.....	89
3.5.3.1. Estantería 1 .....	90
3.5.3.2. Estantería 2 .....	91
3.5.4. Objetos de plástico .....	91
3.5.4.1. Estantería 1 .....	92
3.5.4.2. Estantería 2 .....	93
3.6. CARRO PLÁSTICO EN ESCENARIO CON ESTANTERÍAS OCUPADAS .....	94
3.6.1. Objetos de cartón.....	95
3.6.1.1. Estantería 1 .....	95
3.6.1.2. Estantería 2 .....	96
3.6.2. Objetos de Cristal.....	97
3.6.2.1. Estantería 1 .....	97
3.6.2.2. Estantería 2 .....	98
3.6.3. Objetos de Metal.....	99
3.6.3.1. Estantería 1 .....	100
3.6.3.2. Estantería 2 .....	100
3.6.4. Objetos de Plástico.....	101
3.6.4.1. Estantería 1 .....	102
3.6.4.2. Estantería 2 .....	103
<b>4. CONCLUSIONES .....</b>	<b>104</b>
<b>5. LÍNEAS FUTURAS .....</b>	<b>105</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>106</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>107</b>
<b>ANEXO 1 .....</b>	<b>112</b>

A.1.1 POSICIÓN 1 .....	113
A.1.1.1. Posición carro centro .....	113
A.1.1.1.1. RFID .....	114
A.1.1.1.2. ZigBee .....	115
A.1.1.2. Posición carro estantería 1 .....	115
A.1.1.2.1. RFID .....	116
A.1.1.2.2. ZigBee .....	117
A.1.1.3. Posición carro estantería 2 .....	117
A.1.1.3.1. RFID .....	118
A.1.1.3.2. ZigBee .....	119
A.1.2. POSICIÓN 2 .....	119
A.1.2.1. Posición carro centro .....	120
A.1.2.1.1. RFID .....	120
A.1.2.1.2. ZigBee .....	121
A.1.2.2. Posición carro estantería 1 .....	121
A.1.2.2.1. RFID .....	122
A.1.2.2.2. ZigBee .....	123
A.1.2.3. Posición carro estantería 2 .....	123
A.1.2.3.1. RFID .....	124
A.1.2.3.2. ZigBee .....	125
A.1.3 POSICIÓN 3 .....	125
A.1.3.1 Posición carro centro .....	126
A.1.3.1.1. RFID .....	126
A.1.3.1.2. ZigBee .....	127
A.1.3.2 Posición carro estantería 1 .....	127
A.1.3.2.1. RFID .....	128
A.1.3.2.2. ZigBee .....	129
A.1.3.3 Posición carro estantería 2 .....	129
A.1.3.3.1. RFID .....	130
A.1.3.3.2. ZigBee .....	131
A.1.4 POSICIÓN 4 .....	131
A.1.4.1 Posición carro centro .....	132
A.1.4.1.1. RFID .....	133
A.1.4.1.2. ZigBee .....	134
A.1.4.2 Posición carro estantería 1 .....	134
A.1.4.2.1. RFID .....	135
A.1.4.2.2. ZigBee .....	136
A.1.4.3 Posición carro estantería 2 .....	136
A.1.4.3.1. RFID .....	137
A.1.4.3.2. ZigBee .....	138
A.1.5. RADIALES ESTANTERÍA 2 .....	138
A.1.5.1. Posición antena centro .....	139
A.1.5.1. Posición antena esquina .....	140
<b>ANEXO 2 .....</b>	<b>142</b>
A.2.1. ESCENARIO CON TRES ESTANTERÍAS .....	143
A.2.1.1. RFID .....	144
A.2.1.2. ZigBee .....	145
A.2.2. ESCENARIO GRANDE 1 .....	146
A.2.3. ESCENARIO GRANDE 2 .....	148
A.2.3. ESCENARIO GRANDE 3 .....	150
A.2.3. ESCENARIO GRANDE 4 .....	152
<b>ANEXO 3 .....</b>	<b>154</b>
A.3.1. OBJETOS DE CARTÓN .....	155
A.3.1.1. Estantería 1 .....	155
A.3.1.2. Estantería 2 .....	156
A.3.2. OBJETOS DE CRISTAL .....	157
A.3.2.1. Estantería 1 .....	157
A.3.2.2. Estantería 2 .....	158
A.3.3. OBJETOS DE METAL .....	159

---

A.3.3.1. <i>Estantería 1</i> .....	159
A.3.3.2 <i>Estantería 2</i> .....	160
A.3.4. OBJETOS DE PLÁSTICO.....	161
A.3.4.1. <i>Estantería 1</i> .....	161
A.3.4.2. <i>Estantería 2</i> .....	162
<b>ANEXO 4</b> .....	<b>164</b>
<b>ANEXO 5</b> .....	<b>166</b>
<b>ANEXO 6</b> .....	<b>168</b>

# 1. Introducción

## 1.1. Contexto del proyecto

La tecnología RFID muestra un sin fin de posibilidades a la hora de identificar y gestionar tanto productos como personas o animales. Por lo tanto es lógico pensar que la implantación de esta tecnología en el sector comercial es algo beneficioso e interesante, ya que poder controlar en todo momento lo que sucede con los diferentes productos es algo ideal para quien hace negocio con estos.

Por eso se entiende que el RFID haya tenido un gran éxito en este sector y que cada vez tanto su implantación como el crecimiento de esta sea mayor. La automatización de los procesos de almacenamiento y distribución ofrece grandes ventajas, ya que proporciona una gran reducción de tiempo y errores, además de un gran ahorro de recursos.

El RFID permite gestionar los procesos logísticos a múltiples niveles, empezando desde el almacén. Gracias a la tecnología RFID se puede llevar a cabo una identificación unívoca de las posiciones de almacenamiento y gestionar inteligentemente los huecos.

Además se puede llevar un control de los productos, pudiendo incluso gestionar el stock por caducidad en bienes perecederos. [3]



Figura 1. 1. Ejemplo de aplicación de la tecnología RFID a un Supermercado

Por último muestra un gran aporte en seguridad, ya que los productos están siempre controlados, pudiéndose implantar un sistema que avise de hurtos o de simples confusiones que pueden llevar a la desaparición del producto o a que este acabe en un destino diferente.

## 1.2. Objetivos

El objetivo del proyecto es el análisis del funcionamiento de sistemas inalámbricos aplicado en productos de un centro comercial.

La aplicación de la tecnología RFID y ZigBee en este caso permite facilitar el proceso de compra suministrando una información completa sobre los productos (origen, composición, usos, recomendaciones, etc.) Además de conseguir una mejor imagen frente a los clientes finales, se logra un ambiente más agradable e interactivo que puede mejorar el grado de satisfacción de los mismos. Además de esa interacción directa con los clientes, esta tecnología puede utilizarse en este caso para controlar los stocks de producto a disposición de los clientes en cada momento, es bien conocido que las situaciones de falta de stock suponen uno de los motivos principales de pérdidas de venta. Mediante estanterías “inteligentes” dotadas de lectores de RFID se puede controlar en cada momento la cantidad de producto disponible en tienda y la posterior interacción con los sistemas de Middleware se puede realizar con tecnologías inalámbricas WBAN (Bluetooth) o WLAN.

Dicho tipo de sistemas encuentran gran aceptación por su bajo coste, su reducido consumo energético y su gran flexibilidad para la definición de redes de elementos que desean intercambiar información entre sí.

Debido a las características complejas del canal de RF, es necesario estudiar el efecto del entorno, interferencia y posición de los transceptores.

## 1.3. Herramientas

### 1.3.1. Hardware

El Hardware principal utilizado para las simulaciones ha sido una estación de trabajo Lenovo ThinkStation D20 con las siguientes características.

- Procesador Intel® Xeon® x5650 de doble núcleo (2,66 GHz, Turbo Boost, caché de nivel 2 (L2) de 12 MB)
- Memoria SDRAM DDR2 de 64 GB
- Tarjeta gráfica nVidia Quadro 600 GS de 128 MB
- Disco duro de 1 TB a 7200 rpm



Figura 1. 2 Lenovo ThinkStation D20

El otro Hardware utilizado para simulaciones secundarias ha sido un portátil Acer TravelMate 5720G con las siguientes características:

- Procesador Intel® Core™ 2 Duo procesor T8300 (2'4 Ghz, 800 Mhz FSB, 3 MB L2 cache)
- Memoria DDR2 SDRAM de 4096 MB a 1333 MHz
- Tarjeta gráfica Intel® HD Graphics 3000 de 1 GB
- 2 Discos duros de 320 GB



Figura 1. 3. Acer travelmate 5720G

## 1.3.1. Software

Todo el Software se ha utilizado sobre un sistema operativo Windows 7 Ultimate de 64 Bits.

### 1.3.1.1. Matlab

MATLAB (MATrix LABoratory) es un entorno de desarrollo integrado de computación numérica que utiliza el lenguaje de programación M desarrollado en 1984 por la empresa Math-Works.

La elección de usar Matlab para implementar el algoritmo en el lenguaje de programación ha sido promovida por el hecho de que éste permite realizar operaciones matemáticas numéricas de un modo muy sencillo, gracias a la simplicidad de su sintaxis. Además, Matlab ofrece una gran facilidad a la hora de mostrar los resultados gracias a sus potentes herramientas gráficas. Las características más importantes de Matlab son:

- Lenguaje de programación de alto nivel.
- Entorno de desarrollo para la gestión de código, archivos y datos.
- Funciones matemáticas para el álgebra lineal, estadística, análisis de Fourier, filtrado, optimización e integración numérica.
- Funciones para la visualización de datos en gráficas en 2 y 3 dimensiones.
- Herramientas para la creación de interfaces gráficas de usuario personalizadas.
- Funciones para integrar los algoritmos basados en MATLAB con aplicaciones externas, e idiomas, tales como C, C++, Fortran, Java, COM y Microsoft Excel.





Figura 1. 4. Matlab 2009b

### 1.3.1.2. Sigmaplot

SigmaPlot es un programa de creación de gráficos el cual tiene guías de análisis estadístico con más de 50 métodos estadísticos y 100 tipos de gráficos. Es un programa creado por la empresa SYSTAT® y ha sido galardonado varias veces.

La elección de usar SigmaPlot para representar la mayor parte de los datos obtenidos de las simulaciones ha sido promovida por el hecho de que éste permite la representación de un modo muy sencillo, gracias a su simplicidad, y la gran capacidad de personalización de estos.

- Dispone de más de 80 tipos de gráficos de 2-D y 3-D.
- Personalización de cada detalle de los gráficos.
- Dibuja rápidamente los datos desde plantillas gráficas.
- Puede compartir gráficos de alta calidad en la Web.
- Combina las capacidades estadísticas de SPSS con SigmaPlot.
- Integración total con Microsoft Office.
- Puede dibujar cualquier fórmula matemática.



Figura 1. 5. SigmaPlot 11



## 2. Estado del arte

### 2.1. Radio Frecuencia

#### 2.1.1. Ondas electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas, son aquellas ondas que no necesitan ningún medio material para su propagación, a diferencia de otro tipo de ondas como las acústicas y dentro de ellas se incluyen la luz visible, ondas de radio, microondas, rayos x y entre otras.[1]

Se propagan gracias a la oscilación de un campo magnético y uno eléctrico, transportando energía por el espacio. Las ondas electromagnéticas son transversales y las direcciones de los campos eléctrico y magnético son perpendiculares a la de propagación y entre ellas como se muestra en la siguiente imagen.

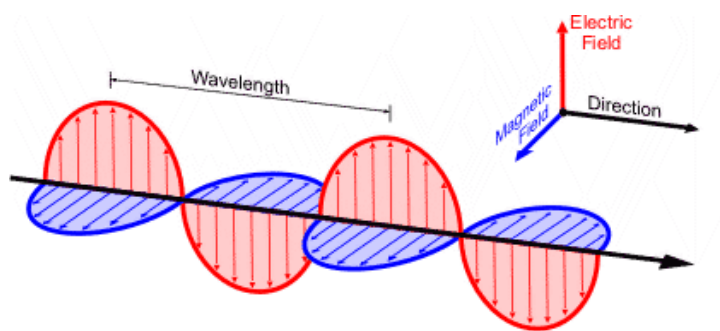


Figura 2. 1. Onda electromagnética [6]

En una onda electromagnética, se describen las siguientes características básicas que nos ayudan a definir como es y cuyo conocimiento es necesario para entenderlas y poder trabajar con ellas:

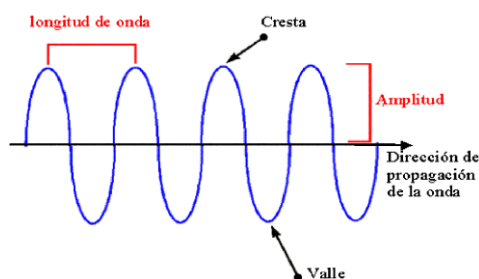


Figura 2. 2. Caracterización de una onda electromagnética [7]

El valor de pico, es la magnitud de la máxima perturbación que genera la onda electromagnética en el medio. Dicho de otra manera es el valor máximo (valor de pico positivo) o mínimo (valor de pico negativo) que alcanza la señal. Si la señal no tiene componente continua, el valor de pico es la amplitud de esta. La separación entre el valor de pico positivo y el valor negativo toma el nombre de valor pico a pico y para señales sinusoidales es el doble de la amplitud. La amplitud de una señal se mide en Voltios (V), para el caso del valor pico a pico en voltios pico-pico (Vpp).

El periodo de una señal es el tiempo que tarda una señal en completar un ciclo y la distancia entre el punto inicial y final de un ciclo se denomina longitud de onda. La unidad del

periodo es el segundo(s). El ciclo de una señal se refiere a cada patrón repetitivo de la onda electromagnética.

La frecuencia es la inversa del periodo y se refiere al número de ciclos que completa la onda en un intervalo de tiempo. En el caso de que este intervalo sea de 1 segundo, la unidad que se utiliza es el Hertzio (Hz). Su cálculo es simple:

$$f = \frac{1}{T}$$

Donde:

f: Frecuencia de la onda en Hertzios (Hz)

T: Periodo de la onda en segundos(s)

La velocidad a la que se desplaza la onda, depende de su naturaleza y del medio por el que se desplaza y se interrelaciona con la frecuencia y con la longitud de onda de la señal mediante la siguiente fórmula:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Donde:

$\lambda$ : Longitud de onda en metros (m)

c: velocidad de la onda en metros por segundo (m/s)

f: frecuencia de la onda en Hertzios (Hz)

Por último se define la fase de una onda que relaciona la posición de una característica de un ciclo, como puede ser un pico, con la situación de la misma característica en otra onda. Se mide típicamente como un ángulo. En la definición de fase viene implícita la comparación de dos ondas con la misma frecuencia.

### 2.1.1.1. Polarización de una onda electromagnética.

La polarización de una onda electromagnética nos dice la dirección del campo eléctrico de esta y su variación con el tiempo. Esta puede ser vertical u horizontal, de tal manera que cuando la polarización es horizontal el campo eléctrico es horizontal y el magnético vertical y cuando es vertical, el campo eléctrico es vertical y el magnético horizontal.

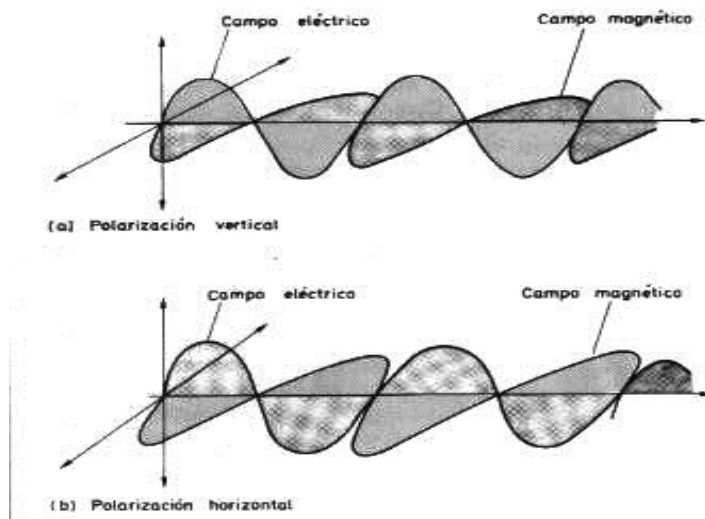


Figura 2. 3. Polarización de una onda electromagnética [8]

## 2.1.2 Radio Propagación

La propagación de las ondas se puede estudiar gracias a las ecuaciones de Maxwell, aunque en muchas ocasiones, este estudio riguroso es impracticable o extremadamente complejo, por lo que para la predicción de las pérdidas de propagación se hace uso de modelos basados en la óptica geométrica. Cuando estos modelos no son validos, se echa mano de modelos empíricos o curvas de propagación normalizadas, conseguidas de mediciones. [1]

Las características de propagación de una onda dependen de diversos factores, situación del trayecto de propagación respecto a los objetos, características eléctricas del terreno, propiedades físicas del medio y de la frecuencia y polarización de la onda.

Para entender mejor como se propaga una onda radioeléctrica, a continuación se explican los tres fenómenos que se dan cuando una onda cambia de medio o se encuentra con un obstáculo:

### 2.1.2.1. Reflexión y refracción

Cuando una onda incide sobre una superficie de separación entre dos medios se pueden producir estos dos fenómenos simultáneamente o individualmente. Si la onda incidente regresa al medio inicial, se da el fenómeno de la reflexión. [1]

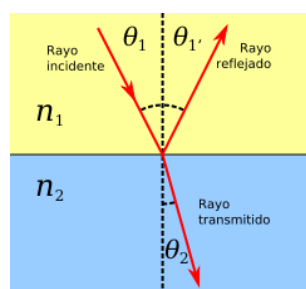


Figura 2. 4.Ley de Fresnell [9]

Dependiendo del tipo de superficie de separación la reflexión puede ser parcial o total y puede producirse un cambio de fase dependiendo de la rigidez de esta. La reflexión total se dará en el caso en el que la onda incida en un conductor perfecto, en el que no habrá ni difracciones ni pérdidas por absorción. Por otro lado, a no ser que la superficie de separación sea un dieléctrico perfecto, se producirán pérdidas de absorción cuando la onda incida.

En el caso de la difracción, la onda se transmite al segundo medio y esta experimenta cambios tanto de velocidad como de dirección. Este fenómeno solo se dará en el caso de que la onda incida oblicuamente en la superficie de separación y sus índices de refracción sean distintos. El índice de refracción determina la reducción de la velocidad de la luz al propagarse por un medio homogéneo.

Las ecuaciones de Fresnell describen la reflexión y refracción de las ondas electromagnéticas en estas circunstancias, pero para ello tenemos que tener en cuenta la polarización de la onda. Así, si la onda tiene polarización vertical, o dicho de otra manera, su polarización es paralela al plano de incidencia, se define la siguiente fórmula:

$$r_{\text{paralelo}} = \frac{E_r}{E_i} = \frac{n_2 \sin\theta_t - n_1 \sin\theta_i}{n_2 \sin\theta_t + n_1 \sin\theta_i}$$

Si por lo contrario la polarización es horizontal o perpendicular, la fórmula es la siguiente:

$$r_{\text{perpendicular}} = \frac{E_r}{E_i} = \frac{n_2 \sin\theta_i - n_1 \sin\theta_t}{n_2 \sin\theta_i + n_1 \sin\theta_t}$$

Donde:

- $r_{\text{paralelo}}$  = Coeficiente de reflexión de Fresnel para la polarización paralela
- $r_{\text{perpendicular}}$  = Coeficiente de reflexión de Fresnel para la polarización perpendicular
- $E_r$  = Campo eléctrico reflejado
- $E_t$  = Campo eléctrico transmitido
- $n_2$  = Coeficiente de refracción del segundo medio
- $n_1$  = Coeficiente de refracción del primer medio
- $i$  = Ángulo de incidencia
- $t$  = Ángulo de transmisión

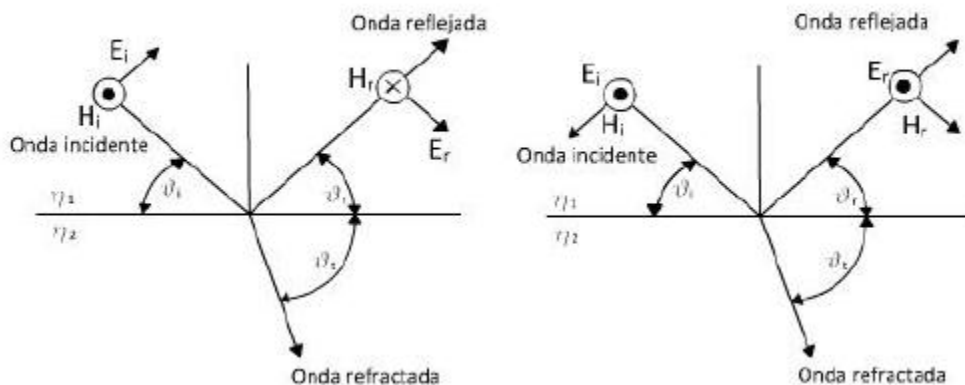


Figura 2. 5. Reflexión dependiendo de la polarización de la onda electromagnética

## 2.1.2.2. Difracción

Cuando un obstáculo se interpone en el camino de la propagación de las ondas se convierte en una fuente secundaria que emite ondas derivadas de la onda inicial. Este fenómeno se da gracias a que las ondas son capaces de rodear el obstáculo. [1]

Para que se dé la difracción la longitud de onda tiene que ser mayor que las dimensiones del objeto, por lo que la difracción se vuelve inapreciable cuando el objeto está dotado de unas dimensiones grandes en referencia a la onda.

Por lo tanto resulta obvio que contra menor sea la frecuencia, más apreciable será la difracción.

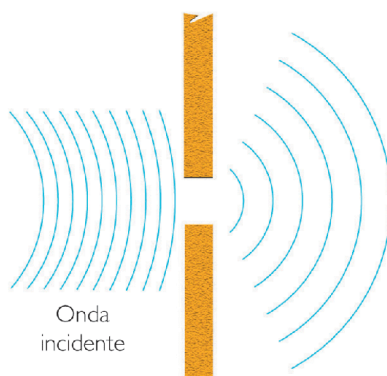


Figura 2. 6. Difracción [10]

## 2.1.2.3. Propagación por onda directa

Cuando el transmisor y el receptor se sitúan en la superficie terrestre y entre ellos existe una visión directa, se modela la propagación mediante dos rayos, uno directo y otro reflejado. [1]

Cuando existe la visión directa hay que tener en cuenta también el siguiente tipo de propagación, la propagación por superficie, ya que dependiendo de la naturaleza del terreno la frecuencia y la polarización de la onda puede ser relevante.

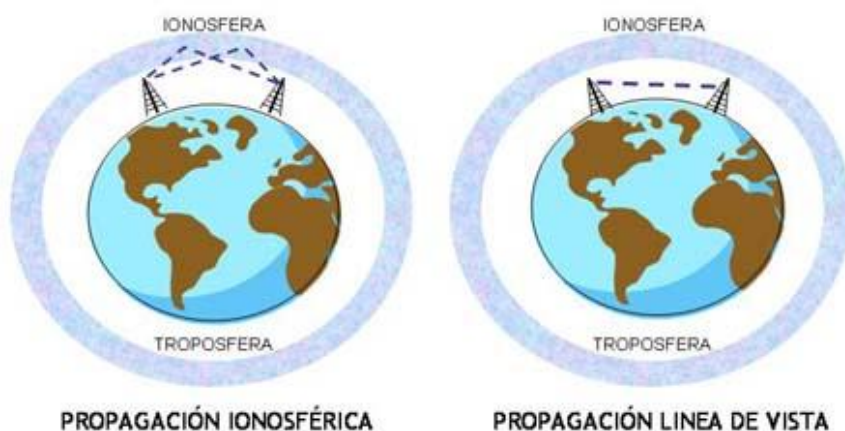


Figura 2. 7. Propagación ionosférica y por onda directa [11]

## 2.1.2.4. Propagación por onda de superficie

Es el modo de propagación dominante para frecuencia bajas, entre 10 KHz y 10 MHz. Esta onda se va curvando y rodeando los obstáculos por efecto de la difracción ya que esta es muy intensa a frecuencias tan bajas. Por ello se ve poco afectada por la curvatura de la tierra. Para que esta onda presente alcances útiles, su polarización ha de ser vertical, ya que las componentes horizontales son absorbidas por el suelo. [1]

## 2.1.2.5. Propagación troposférica

Esta propagación puede actuar de dos formas diferentes, directamente de antena a antena, en caso de que estas tengan visión directa, o radiándose con cierto ángulo hacia los niveles superiores de la troposfera, donde esta se refleja hacia la tierra. El primer método está condicionado a la situación del receptor y el transmisor, ya que estos necesitan estar dentro de distancias de visión, la cual está limitada por la curvatura de la tierra, por lo que el segundo método cubre mayores distancias.[4]

## 2.1.2.6. Propagación ionosférica

En este tipo de propagación, las ondas de radio de alta frecuencia se radian hacia la ionosfera donde se reflejan. La densidad entre troposfera e ionosfera, hace que la onda de radio se acelere y cambie de dirección, curvándose de nuevo hacia la tierra. La ventaja de esta transmisión es que permite cubrir grandes distancias con menor potencia de salida. [4]

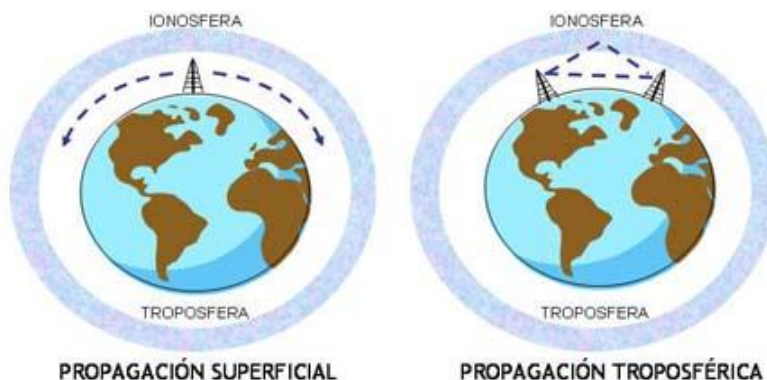


Figura 2. 8. Propagación superficial y troposférica [11]

## 2.1.2.7. Propagación por el espacio

Para llevar a cabo esta propagación la onda es irradiada hacia el espacio, donde un satélite retransmitirá la señal sin necesidad de que se dé lugar la difracción atmosférica. Es básicamente una transmisión de visión directa haciendo uso de un intermediario. Con este sistema, se incrementa considerablemente la distancia que puede cubrir una señal.

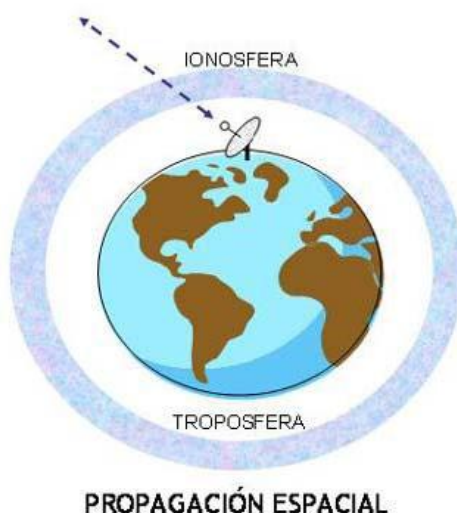


Figura 2. 9. Propagación espacial [11]

## 2.1.3. Radiocomunicación

En este apartado se define la radiocomunicación y todos los conceptos básicos que tienen que ver con esta. [1]

La radiocomunicación se define como la telecomunicación que se realiza por medio de ondas radioeléctricas. Las ondas radioeléctricas son aquellas ondas electromagnéticas que se propagan por el espacio sin guía artificial y cuyo límite superior de frecuencia se fija en 3000 GHz.

La técnica de la radiocomunicación consiste en superponer la información a transmitir en una onda electromagnética denominada portadora. La inserción de esta información toma el nombre de modulación.

Como consecuencia se genera una onda modulada, en cuyo espectro se encuentra un conjunto de frecuencias en torno a la portadora, que es enviada al medio de propagación a través de un dispositivo de acoplamiento con el medio denominado antena.

La antena genera un flujo saliente de energía en forma de ondas electromagnéticas que toma el nombre de radiación.

El conjunto de equipos necesarios para el tratamiento de la información entre los que se encuentran antenas, moduladores, filtros y demás, forma la estación transmisora. La radiación producida por la estación se conoce como emisión o dicho de otra manera, el proceso de radiar una onda modulada.

La radiocomunicación se produce entre la estación emisora ya descrita y una estación receptora, que es el conjunto de equipos necesarios para el tratamiento de la señal recibida (antenas, amplificadores, demoduladores y filtros). La onda modulada generada en la estación transmisora y emitida al medio de propagación alcanza el punto o puntos de destino donde accede al sistema receptor por medio de una antena de recepción, la cual recoge una fracción de la energía radioeléctrica transmitida.

En todo este proceso, tanto los órganos de recepción como los de transmisión contribuyen positivamente a la radiocomunicación, a diferencia del medio de transmisión, que introduce pérdidas y diversos tipos de perturbaciones, las cuales se explican a continuación.



## 2.1.3.1. Distorsión

Se define distorsión como la diferencia entre la señal que entra en un sistema y la señal que sale de este, por lo tanto se podría decir que es la deformación que producen las diferentes partes del sistema en la forma de la señal original. [1]

Se dan dos tipos de distorsiones, las lineales y las no lineales. Dentro de las distorsiones lineales se encuentran las distorsiones de amplitud y fase.

La distorsión de amplitud se da cuando la señal a la salida del equipo no guarda la misma relación de amplitud que guarda la señal de entrada entre diferentes frecuencias. La de fase en cambio, se produce cuando a la salida no se conserva la relación de fase entre diferentes frecuencias.

Las distorsiones no lineales se producen cuando en la señal de salida aparecen frecuencias no deseadas que no había en la señal de entrada.

## 2.1.3.2. Ruido e interferencias

Las perturbaciones debidas al ruido se dan cuando aparece una señal no deseada de origen natural o artificial y las interferencias en cambio, son señales emitidas por otros destinos presentes en el receptor que el emisor no había emitido.[1]

La potencia extraída de la onda radioeléctrica debe competir tanto con la potencia del ruido como con la potencia de interferencia, por lo que se establece un valor umbral que depende de la clase de radiocomunicación y frecuencia de la portadora, por debajo del cual no se puede recuperar la información.

El alcance útil o cobertura de una emisión radioeléctrica depende del tipo e intensidad de las perturbaciones. Cuando solo interviene el ruido, el umbral es la potencia mínima para obtener cierta calidad de recepción. En el caso de que la perturbación la genere una interferencia, el alcance de cobertura viene establecido por la relación de potencia entre la señal deseada y la señal interferente para una calidad de recepción específica.

## 2.1.3.3. Modos de explotación

Los modos de explotación se refieren a la forma en el que se comunican dos puntos de enlace y en radiocomunicación se distinguen tres modos de explotación.

### 2.1.3.3.1. Simplex

Modo de explotación que solo permite transmitir alternativamente en uno u otro sentido de un canal de radiocomunicación pero nunca en los dos sentidos.

### 2.1.3.3.2. Dúplex



Modo de explotación que permite la transmisión en los dos sentidos de un canal de radiocomunicación. Para que esto sea posible es necesario el uso de dos frecuencias para la transmisión en los dos sentidos.

### 2.1.3.3.3. Semiduplex

Modo de explotación simplex en un punto del enlace y en el otro modo dúplex, en este caso también es necesario el uso de dos frecuencias diferentes para la comunicación.

### 2.1.3.4. Frecuencias radioeléctricas

El espectro radioeléctrico se divide en bandas de frecuencia y estas se atribuyen a los diferentes servicios radioeléctricos. El espectro radioeléctrico es un recurso natural muy escaso, por lo que su uso debe ser lo más óptimo posible y el hecho de necesitar una frecuencia radioeléctrica para cada enlace de radiocomunicación hace de esta labor algo muy complicado.  
[1]

Las atribuciones son efectuadas por la UIT y quedan recogidas en el Cuadro de Atribuciones de Bandas de Frecuencias del Reglamento de Radiocomunicaciones.

La tecnología RFID trabaja en tres bandas de frecuencia diferentes, LF (125 KHz), HF (13,56 KHz) y UHF (860-960 MHz y 2,4 GHz).

Además, se divide el mundo en tres regiones diferentes y se distribuyen tres tipos de servicios, primarios, permitidos y secundarios.

Los servicios primarios y permitidos tienen los mismos derechos, pero los primarios tienen preferencia a la hora de elegir frecuencia. Los secundarios sin embargo pueden usar las frecuencias del cuadro, pero no pueden interferir en los primarios o permitidos

## 2.2. Tecnología RFID

### 2.2.1. Introducción

En los últimos años los procedimientos de identificación automática se han convertido en algo popular en muchos sectores, logística de distribución y compra, industria, compañías de manufactura, sistemas de flujo de materiales, identificación de personas o animales, etc. En definitiva, la identificación automática existe para proporcionar información sobre personas, animales, bienes y productos de tránsito.

El código de barras, lo que supuso una revolución en los sistemas de identificación, es cada vez más inadecuado, ya que a pesar de ser un sistema muy barato, su capacidad de almacenamiento es reducida y no se pueden reprogramar.

La solución técnicamente más óptima es el almacenamiento en chips de silicio, un sistema muy común hoy en día dado su uso en tarjetas inteligentes basadas en un campo de contacto (tarjetas bancarias, tarjetas de teléfono, etc.). Pero presenta una gran desventaja, la necesidad de contacto mecánico entre el dispositivo emisor y el dispositivo receptor, lo que lo convierte en algo poco flexible.

Lo ideal es un sistema flexible, barato, robusto y en definitiva versátil que adquiere el nombre de RFID o identificación por radiofrecuencia. Este sistema cumple las cuatro condiciones, ya que el tag o receptor puede ser una pegatina con un chip que se sitúa en cualquier parte del objeto a identificar y que siendo pasivo no necesitara ningún tipo de alimentación. Además su lectura se llevara a cabo mediante radiofrecuencia, lo que implica que no sea necesaria la visión directa entre receptor y emisor.

## 2.2.2. Historia del RFID

Los primeros ejemplos de procedimientos similares a RFID se remontan a la década de 1920 y se relaciona con la II Guerra Mundial, donde el uso del radar para detectar aviones era algo habitual. El problema era que no había manera de distinguir entre aviones amigos o enemigos, pero el ejército alemán descubrió que si los pilotos balanceaban sus alas al volver a la base, la señal de radio reflejada cambiaria, funcionando de forma similar a un dispositivo RFID pasivo.[5]

En 1939 los británicos inventaron el sistema IFF (“Identification Friend or For” o “Identificación Amigo o Enemigo”), una tecnología que servía para identificar aeroplanos utilizada en la II Guerra Mundial. La primera serie de equipos electrónicos que se construyeron para la identificación recibieron el nombre de “Transponders” (Equipos que reciben en una frecuencia y transmiten en otra), que estuvo operativa a partir de 1940 con el nombre de MARK I.

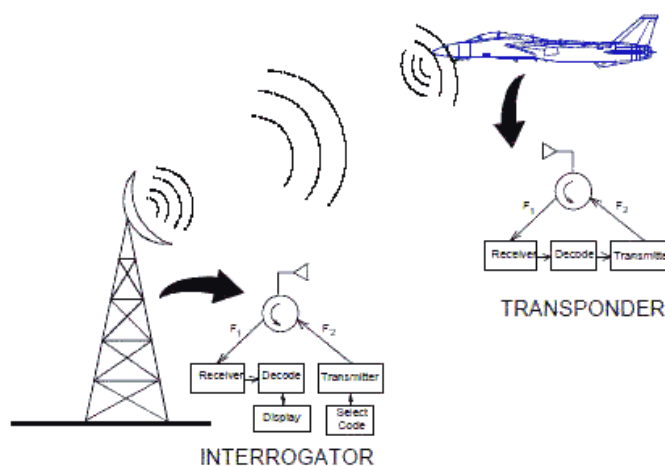


Figura 2. 10. Sistema IFF [12]

En la década de los 60 se implantaría el EAS “Electronic Article Surveillance” (Vigilancia Electrónica de Artículos), un sencillo sistema para detectar robos en grandes almacenes, que solo usaba un bit para detectar la etiqueta o no por el lector y hacer sonar una alarma acústica en caso de que pasara una etiqueta sin desactivar. Este método era muy económico y efectivo por lo que su uso se extendió rápido.

En 1973 Mario Cardullo patentó lo que sería el primer antecesor real del RFID moderno, un transceptor de radio pasivo con memoria. Este dispositivo estaba potenciado por la señal emisora y contaba con 16 bits de memoria. Fue demostrado ante la autoridad portuaria de Nueva York y otros usuarios potenciales en 1971 y su objetivo era ser un dispositivo de peaje. Este sistema abría las puertas sin necesidad de llaves, una tarjeta con un transpondedor comunicaba una señal al lector de la puerta que cuando validaba la tarjeta desbloqueaba la cerradura.

El plan de negocio original presentaba usos en los sectores de transporte (identificación de vehículos, sistema automático de peaje, placas vehiculares electrónicas, etc.), banca (cheque

electrónico, tarjetas de crédito electrónicas), seguridad (identificación de personal, vigilancia) y cuidados de la salud (Identificación, historial de pacientes), muchos de los ámbitos en los que hoy en día es utilizado el RFID.

En la década de los 80 empezó a implementarse esta tecnología, en EEUU se implementó en aplicaciones para transporte acceso y en menor medida en los animales y en países europeos como Francia, España, Portugal e Italia se centraron en aplicaciones industriales y sistemas de corto alcance para controlar animales.

En la década de los 90 el RFID seguiría extendiéndose con el uso en EEUU del peaje con control remoto al paso de los vehículos, en Europa se usaría para el control de acceso y billetes electrónicos. Por último se daría un gran avance en el mundo del automóvil implantándose varias acciones como el sistema de control de encendido y de acceso al automóvil. El éxito de la tecnología RFID hizo que se a partir de aquí se aplicara en otros muchos campos.

Actualmente el principal desarrollador y responsable de implantar esta tecnología es Auto ID Labs, una sociedad constituida en 1999 que se conforma de un centenar de empresas, universidades y centros de investigación de todo el mundo. Estos son los responsables de desarrollar la red EPC (Código Electrónico de Producto) y sus componentes. El EPC es un código único que se graba en el tag RFID y se coloca en cada producto, pudiendo hacer un seguimiento exacto de cada unidad física. Este contendrá el Global Trade Item Number (GTIN), identificación de la empresa y producto del sistema más otros datos adicionales, dándole la identificación única. Este código tiene 96 bits.

## 2.2.3. ¿Qué es la tecnología RFID?

El RFID es una tecnología que haciendo uso de las ondas electromagnéticas es capaz de intercambiar información de identificación mediante diferentes dispositivos, que normalmente se componen de etiquetas o tags que guardan la información del objeto específico y una antena que se encarga de preguntar y posteriormente recibe la información.

RFID cuyas siglas en inglés significan Radio Frequency Identification (Identificación por radiofrecuencia) es un sistema englobado dentro de los Auto-ID (Auto Identification) junto con los sistemas de código de barras, identificación ocular, identificación por voz y demás. La característica común de todos estos sistemas es que son capaces de identificar algo automáticamente o sin necesidad de que un humano intervenga en el proceso de identificación.

### 2.2.3.1. Sistemas Auto-Id

Se diferencian cuatro tipos de sistemas Auto-Id además del sistema RFID, de los cuales se hará una pequeña descripción en las siguientes líneas [2]

#### 2.2.3.1.1. Código de barras

El código de barras es de todos los sistemas Auto-ID el más extendido y seguramente el más conocido, ya que existe desde 1952 y empezó a comercializarse en la década de los 60, aunque no sería un éxito comercial hasta 1980.

Es una técnica de entrada de datos que está compuesta por barras y espacios paralelos de anchura variable que representan números descifrables por lectores ópticos o scanners. El código identifica cada producto de forma única, ya que cuenta con información detallada del artículo o del documento que contiene esta información, gracias a la asociación con una base de datos.

Los lectores ópticos que se encargan de obtener la información emiten una luz roja que se refleja en los patrones de luz clara y oscura contenidos en las barras y espacios. Estos reflejos son tomados por un transductor incorporado en el escáner que los convierte en una señal eléctrica que se puede interpretar como unos y ceros.

Este sistema permite la identificación de cada producto de una forma única y global, sin ningún tipo de ambigüedad, por lo que proporciona información oportuna y veraz en el momento que esta se requiere.

Aunque el uso común y con el que todo el mundo lo asocia sea el de la compraventa, hoy en día está extendido en muchos otros sectores, en la industria, instituciones educativas, la banca, aduanas, aseguradoras, etc.

Se dividen en dos grupos, los lineales o de una dimensión y los bidireccionales o de dos dimensiones. Los lineales solo contienen una línea de información de 20 dígitos, mientras que los bidireccionales, son capaces de representar 2725 dígitos, por lo que se usa en procesos en los que se requiere guardar más información, como por ejemplo en documentos para controlar su envío o en seguros médicos.



Figura 2. 11. Código de barras unidireccional y bidireccional

## 2.2.3.1.2. Reconocimiento óptico de caracteres

Este proceso resulta muy útil ya que existe y continuamente se genera una gran cantidad de información escrita, tipográfica o manuscrita y la conversión de esta información analógica a un formato digital sin necesidad de que un ser humano la teclee, ahorra muchos recursos humanos y aumenta mucho la productividad.

El reconocimiento óptico de caracteres es el proceso de cambiar una imagen digitalizada en texto editable con un ordenador. Una imagen es un gráfico electrónico de texto y esta no se puede editar, ya que está definida por píxeles que conforman el gráfico.

Este sistema se inicia a partir del análisis de las imágenes, que pueden ser escaneadas o digitalizadas de cualquier otra forma. Este proceso convertirá este conjunto de puntos que forman los caracteres, en caracteres manipulables, mediante la comparación de estos con patrones o plantillas que contienen todos los posibles caracteres.

Pero este proceso no es nada simple, necesita de muchas técnicas de procesamiento de imagen para que la información contenida en los textos escritos, se digitalice adecuadamente y

sin ningún tipo de error y más cuando el texto es manuscrito y las características de este dependen de las costumbres de escritura del creador.

El reconocimiento óptico es muy útil en muchos sectores, de los que se destacan el reconocimiento de matriculas, digitalización de libros o indexación en bases de datos.

### 2.2.3.1.3. Sistemas biométricos

Los sistemas biométricos hacen uso de la biometría o ciencia que se dedica a la identificación de individuos a partir de una característica anatómica o un rasgo de su comportamiento. Por lo tanto aprovechan las características que solo se dan en un individuo y son irrepetibles para poder identificarlo de manera inequívoca.

En un sistema biométrico, la persona es reconocida por el sistema cuando todas o casi todas las características que antes han sido registradas y guardadas en una base de datos, concuerdan con esta, de tal manera que si otra persona, cuyas características nunca serán similares o iguales a la de otra persona intenta identificarse, el sistema lo rechazara.



**Figura 2. 12. Sistema de reconocimiento por huella dactilar.**

Dentro de estos sistemas se encuentran las huellas dactilares, las retinas, el iris, los patrones faciales entre otras muchas. Como el objeto de este proyecto no se centra en describir los diferentes sistemas de auto-Id no se hará hincapié en la forma de lectura de ninguna de estas características.

### 3.2.2.1.4. Tarjetas inteligentes

Las tarjetas inteligentes junto a los códigos de barras es uno de los sistemas Auto-Id más extendido hoy en día en gran parte gracias a las tarjetas de crédito. Estas tarjetas existen desde la década de los setenta, aunque su uso masivo no llegó hasta la década de los ochenta cuando en Francia se empezaron a usar para el pago del teléfono público. Aunque el mayor auge lo sufrieron con la llegada de la telefonía móvil y las tarjetas SIM.

La tarjeta inteligente no es más que una tarjeta con un circuito integrado que permite la ejecución de cierta lógica programada. Las tarjetas permiten tres tipos de tareas, almacenar, encriptar y leer y escribir información.

El lector es el que proporciona la alimentación necesaria para que esta funcione, por lo tanto se puede afirmar que se trata de un sistema pasivo y por lo tanto no necesita alimentación propia, lo que facilita que su tamaño sea reducido.

Un contacto metálico, o una lectura laser permite la transferencia de información entre el lector y la tarjeta y la tasa de transferencia de datos es de 9600 baudios.

Estas tarjetas se usan en numerosos campos para diferentes funciones, entre ellas las más destacables, tarjetas SIM, tarjetas de crédito, tarjetas monedero etc.



Figura 2. 13. Tarjeta inteligente

## 2.2.4. Ventajas del uso de la tecnología RFID

Una vez presentados todos los sistemas de Auto-id, se puede ver porque el RFID es el más efectivo de todos ellos, por lo menos para la función que toma en este proyecto. En primer lugar no necesita visión directa como el código de barras, cuya forma de lectura es óptica. Además, el número de datos almacenables en un sistema RFID es superior. Los sistemas Biométricos en cambio, solo son útiles para la identificación de seres humanos y quizás de animales, pero nunca para objetos inanimados.

El reconocimiento óptico si se implementa de forma eficaz ofrece grandes posibilidades para digitalizar información, pero el proceso de lectura es demasiado complejo, comparado con el código de barras por ejemplo.

Por último se podría pensar que las tarjetas inteligentes son la alternativa más óptima a los sistemas RFID, pero estas presentan un gran inconveniente, ya que necesitan de contacto directo para el intercambio de información y eso es muchas circunstancias no resulta práctico.

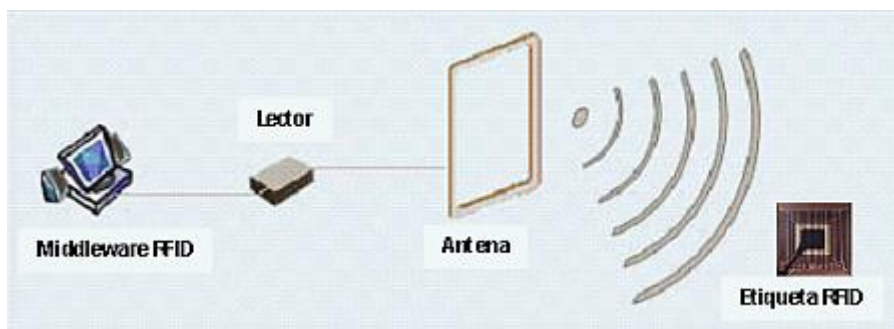
Las etiquetas RFID son dispositivos de tamaño reducido que pueden ser adheridos o colocados en el objeto a identificar, ya sea un producto, animal, o persona. En última instancia no es más que una antena que gracias a la influencia del campo interrogador producido por el lector envía una secuencia de datos que contienen la información de identificación.

Este sistema muestra una gran ventaja, ya que se puede hacer una identificación sin necesidad de que antena y tag tengan visión directa ya que este proceso se lleva a cabo mediante radiofrecuencia. Esto también muestra un gran inconveniente, puesto que las ondas electromagnéticas pueden invadir áreas no deseadas, con el consecuente riesgo en seguridad por el uso indebido que puedan hacer terceras personas de estas o simplemente por que interfieran con otros sistemas electromagnéticos.

## 2.2.4. Fundamentos básicos de los sistemas RFID



El esquema básico del sistema RFID se compone de un tag y un lector conectado a una antena y una base de datos, aunque este lector pueda hacer las veces de emisor y receptor en muchas ocasiones se usa un dispositivo que emite la señal interrogante y otro que recibe la respuesta del tag.

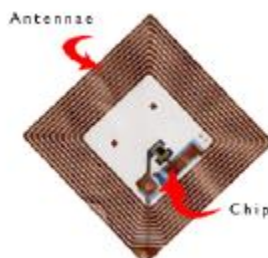


**Figura 2. 14. Esquema básico de un sistema RFID**

Dentro de este esquema, el ordenador central o base de datos es el encargado de controlar el funcionamiento del conjunto de los elementos y realizar la gestión de los datos obtenidos. El lector es el encargado de comunicarse con el tag o etiqueta que contiene la información que queremos obtener mediante radiofrecuencia.

La comunicación entre lector y tag a priori parece un procedimiento muy simple, el lector genera un campo electromagnético que excita el transpondedor lo que provoca que este envíe la información previamente guardada en el.

Los tags RFID típicamente se componen de una antena emisora y un chip que guarda la información, aunque también existen las etiquetas que no contienen ninguna información y solo avisan de su presencia, estas forman parte del sistema EAS.



**Figura 2. 15. Tag RFID**

Los tags se pueden dividir en dos grupos, activos y pasivos. La diferencia entre ellos es que las etiquetas pasivas no tienen ninguna fuente de alimentación incorporada y su total alimentación depende exclusivamente del campo electromagnético generado por el lector y los tags activos en cambio, cuentan con una fuente de alimentación interna. La ventaja principal del segundo tipo de tag es que permite comunicaciones a más largas distancias ya que la energía recibida se usa íntegramente para enviar el mensaje y no se desvía parte a alimentar el chip.

A continuación se da una descripción más precisa de los tipos de transpondedor y su modo de funcionamiento.

## 2.2.5. Clasificación de transpondedores RFID

A continuación se lleva a cabo una clasificación de los diferentes tipos de transpondedores RFID que existen hoy en día en el mercado y se explica su funcionamiento.

## 2.2.5.1. Transpondedor de 1 bit

Un bit es la unidad más pequeña de información que puede ser representada y tiene solo dos estados (1 y 0). Lo que significa que los sistemas basados en un transpondedor de 1 bit solo pueden representar dos estados “Transpondedor en la zona de interrogación” y “No hay transpondedor en la zona de interrogación”. A pesar de sus limitaciones, los transpondedores de 1-bit están muy extendidos, principalmente en los dispositivos electrónicos antirrobo en tiendas (EAS).

El sistema EAS se compone de los siguientes componentes: El lector o interrogador, el elemento de seguridad o etiqueta y un dispositivo de desactivación opcional que permite desactivar la etiqueta después del pago.

La característica principal del funcionamiento para todos los sistemas es el reconocimiento o la tasa de detección en relación con el ancho de la puerta (distancia máxima entre el transpondedor y la antena interrogante).

### 2.2.5.1.1. Radio frecuencia

La radiofrecuencia (RF) se basa en circuitos resonantes LC ajustados a una frecuencia de resonancia definida. El tag está compuesto por bobinas grabadas entre láminas en forma de etiquetas adhesivas. El lector genera un campo magnético alterno y si el circuito LC resonante se acerca a las proximidades del campo magnético alterno, la energía del campo puede ser inducida en el circuito de resonancia a través de sus anillos gracias a la ley de Faraday. Si la frecuencia del campo alterno se corresponde con la frecuencia del circuito, este produce una oscilación simpática.

Por consecuencia de esto, la corriente que fluye en el circuito de resonancia actúa en contra de su causa, es decir, actúa contra el campo magnético externo, produciendo un pequeño cambio en la caída de tensión en la bobina del generador de emisor, lo que genera un debilitamiento de la intensidad del campo magnético medible.

La magnitud relativa de los cambios en el voltaje en el generador y las bobinas del sensor es generalmente muy baja y por lo tanto difícil de detectar, pero interesa que la señal sea lo más clara posible para que el detector funcione de manera fiable. Para esto se usa una frecuencia del campo magnético variable o un barrido de frecuencias, produciéndose una caída de tensión clara cuando las dos frecuencias coinciden.

### 2.2.5.1.2. Microondas

El sistema EAS en el rango de microondas explota la generación de armónicos en componentes de características no lineales, por ejemplo, los diodos.

Cuando el transpondedor se encuentra dentro del alcance del transmisor, el flujo de corriente en el diodo genera y emite armónicos de la onda portadora. El segundo armónico es detectado por un receptor ajustado a la frecuencia precisa que puede activar un sistema de alarma. Las señales distintivas, se obtienen en dos o tres veces la onda portadora, en función del diodo utilizado.

Si la amplitud es modulada entonces los armónicos incorporaran la misma modulación, pudiendo así distinguir entre las interferencias y las señales útiles, evitando falsas alarmas.



El diseño de un transpondedor de 1-bit para la generación de armónicos es muy simple, se conecta un diodo de capacitancia a la base de un dipolo ajustado a la onda portadora.

Este tipo de transpondedores se utilizan para proteger textiles y se remueven en la caja, pudiéndose volver a usar en el futuro.

### 2.2.5.1.3. Divisor de frecuencia

Este procedimiento funciona en la banda de onda larga (100-135,5 kHz). Las etiquetas contienen un circuito semiconductor o microchip y una bobina de un circuito resonante. El circuito de resonancia está hecho para resonar en la frecuencia de funcionamiento del sistema EAS utilizando un condensador soldado.

El microchip está alimentado por el campo magnético del dispositivo de seguridad y su función es dividir la frecuencia de la bobina y enviarla de vuelta al dispositivo de seguridad

El campo magnético del dispositivo se modula a una frecuencia más baja para mejorar la tasa de detección al igual que en el procedimiento para la generación de armónicos.

Estos transceptores se suelen encontrar en forma de etiquetas duras y se eliminan cuando se compra el producto.

### 2.2.5.1.4. Electromagnéticos

Funcionan con fuertes campos magnéticos del orden de 10 Hz a 20 kHz. Los elementos de seguridad contienen una banda magnética de metal amorfo con una empinada curva de histéresis. La magnetización de estas franjas se invierte periódicamente y las tiras se saturan por el fuerte campo magnético alterno.

La relación no lineal entre la intensidad de campo  $H$  y la densidad de flujo magnético  $B$  cerca de la saturación, además del repentino cambio de densidad del flujo  $B$  en las cercanías del cruce por cero de la intensidad de campo  $H$ , genera armónicos a la frecuencia del dispositivo de seguridad que pueden ser recibidos y evaluados por este.

Debido a la frecuencia de operación baja de este sistema, el sistema electromagnético es el único sistema adecuado para los productos que contienen metal, aunque muestran un gran inconveniente, la función de los tags dependen de la posición.

Las etiquetas están disponibles en forma de tiras autoadhesivas con longitudes que van desde unos pocos cm a 20 cm. Para su desactivación, las etiquetas están recubiertas de una capa magnética de metal duro y se lleva a cabo aplicando un potente imán duro a lo largo de la tira de metal para desactivar los elementos de seguridad.

Las etiquetas se pueden reactivar en cualquier momento por desmagnetización y tanto el proceso de activación como el de desactivación se puede llevar a cabo tantas veces se quiera. Por esta razón, estos sistemas fueron utilizados originalmente en las bibliotecas de préstamos, aunque gracias a que son pequeñas y económicas se utilizan cada vez más en la industria de comestibles.

## 2.2.5.1.5. Acústico-magnéticos

Estos elementos de seguridad consisten en cajas de plástico muy pequeñas (40mm de largo y de 8 a 14mm de ancho y 1 mm de alto), que contienen dos placas metálicas, una tira de metal duro magnético conectado a la caja de plástico y una tira de metal amorfo que es libre para vibrar mecánicamente.

Los metales ferromagnéticos cambian ligeramente su longitud en un campo magnético bajo la influencia de la intensidad del campo  $H$ . Este efecto se denomina magnetostricción y es el resultado de un pequeño cambio de la distancia interatómica como resultado de la magnetización. En un campo magnético alterno, una tira de metal magnetostrictiva vibra en la dirección longitudinal de la frecuencia de campo, teniendo una amplitud mucho más elevada si la frecuencia del campo magnético corresponde con la frecuencia de resonancia de la tira de metal.

El factor decisivo es que el efecto magnetostrictivo es reversible, es decir, que una tira de metal oscilante magnetostrictiva emite un campo magnético alterno. El sistema está diseñado para que la frecuencia del campo magnético generado coincida con la frecuencia de resonancia de las tiras de metal del elemento de seguridad, de tal manera que la tira de metal amorfa empiece a oscilar bajo la influencia del campo magnético. Si este campo se apaga, la banda magnética excitada seguirá oscilando pasado un tiempo de tal manera que el sistema de seguridad pueda detectarlo.

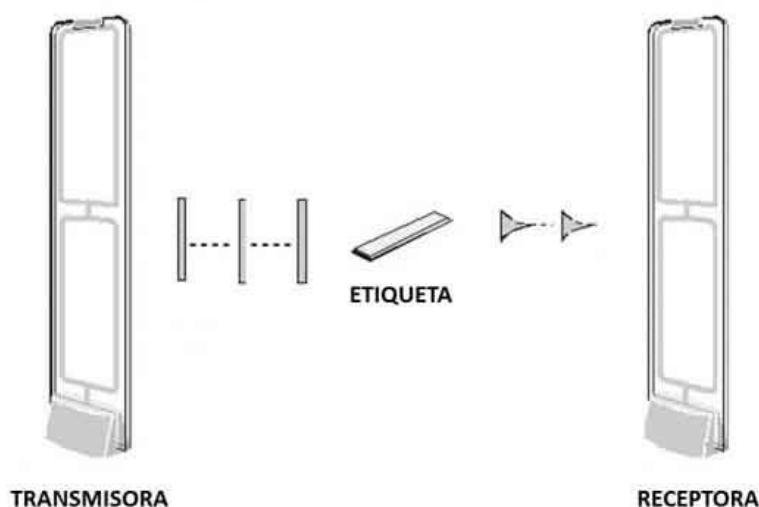


Figura 2. 16.Sistema acústico-magnético

La gran ventaja de este sistema por lo tanto es que el sistema de seguridad no está transmitiendo mientras el tag está respondiendo por lo que el receptor se podrá diseñar con un menor grado de sensibilidad.

En su estado activo, los elementos de seguridad acústico-magnéticos están magnetizados y para desactivarlos hay que desmagnetizar la tira de metal duro magnético. De esta manera, se desafina la frecuencia de resonancia de la tira y por lo tanto no puede ser excitado por la frecuencia de funcionamiento del sistema. La tira de metal duro, solo puede ser desmagnetizada por un fuerte campo magnético alterno con una intensidad de campo de decaimiento lento, lo que hace imposible que los clientes desactiven el sistema mediante el uso de imanes permanentes.

## 2.2.5.2. Transpondedor de n-bit

A diferencia de los transpondedores de 1-bit, que normalmente explotan simples efectos físicos, los transpondedores de n-bits hacen uso de un microchip electrónico como dispositivo de soporte. Estos tienen una capacidad de almacenamiento de datos de unos pocos kilobytes.

Para leer o escribir datos en el dispositivo, se debe poder transferir datos entre el emisor y receptor y esto se lleva a cabo de acuerdo con uno de los dos procedimientos principales: full y half Duplex o los sistemas secuenciales.

### 2.2.5.2.1. Sistemas Half y Full dúplex

El sistema half dúplex alterna la transferencia de datos del transpondedor al lector con la transferencia de datos desde el lector para el transpondedor en frecuencia inferiores a 30 MHz.

En el sistema full dúplex sin embargo la transferencia de datos en las dos direcciones es simultánea, por lo que es necesario que las dos señales viajen en frecuencias diferentes.

Ambos sistemas tienen en común que la transmisión de datos es continua, a diferencia de los sistemas secuenciales, que la transmisión de datos se da en un pequeño intervalo de tiempo.

#### 2.2.5.2.1.1. Acoplamiento inductivo

Un transpondedor de acoplamiento inductivo está formado por un único microchip y una bobina que hace la función de antena. Estos transpondedores normalmente son pasivos, lo que significa que la energía necesaria para que el microchip funcione es facilitada por el lector.

El lector genera un fuerte campo electromagnético, que podría ser tratado simplemente como un campo magnético, que penetra en la bobina de la antena del transpondedor, generándose así la tensión que alimenta el microchip.

Si un transpondedor de resonancia se coloca dentro del campo magnético alterno de la antena del lector, el transpondedor absorberá la energía del campo magnético. La información resultante del transpondedor en la antena del lector puede ser representada como la impedancia transformada en la bobina de la antena del lector.

Apagando y encendiendo una resistencia de carga, se conseguirá un cambio en la impedancia y por lo tanto cambios de tensión en la antena del lector. Si el tiempo de apagado y encendido de la resistencia se controla mediante datos, estos datos serán transferidos al lector. Este tipo de transferencia de datos, se llama modulación de carga.

Los datos se transfieren modulados en ASK, FSK o PSK. La modulación de carga con una subportadora crea dos bandas laterales de modulación en la antena del lector a la distancia de la frecuencia de la subportadora. Estas bandas laterales de modulación, se pueden separar de la señal del lector mediante un filtro paso banda, haciendo mucho más fácil su demodulación.

Debido al gran ancho de banda necesario para la transmisión de una subportadora, este procedimiento solo se lleva a cabo en frecuencias ISM, 6,78 MHz, 13,56MHz y 27,125MHz.

## 2.2.5.2.1.2. Acoplamiento electromagnético de retrodispersión

Los sistemas RFID en la que la distancia entre el lector y el transpondedor es superior a 1 metro se denominan de largo alcance. Estos sistemas funcionan en las frecuencias UHF de 868 MHz (Europa) y 915 MHz (EEUU) y en la frecuencia de microondas de 2,5 GHz y 5,8 GHz. Las longitudes de onda corta de esas bandas de frecuencia facilitan la construcción de antenas de dimensiones mucho más pequeñas y eficaces que utilizando rangos de frecuencia inferiores a 30 MHz.

Estos sistemas RFID son capaces de trabajar a una distancia de alrededor de 3 metros a la frecuencia de 868 MHz y a poco más de 1 metro a 2,45 GHz, por lo tanto, con el fin de alcanzar grandes distancias, de hasta 15 metros a menudo se les agrega una batería. Para que no se de un uso de la batería innecesario, los microchips se diseñan para que en el caso en el que el transpondedor este fuera del alcance del lector, el chip se ponga en modo de ahorro de energía. El chip no se reactiva hasta que llegue una señal lo suficientemente potente.



Figura 2. 17. Tag de acoplamiento electromagnético de retrodispersión

En cualquier caso, la batería nunca proporcionara energía para la transmisión, su función es única y exclusivamente alimentar el chip, la transmisión de datos entre el transpondedor y el lector se basa siempre en la potencia del campo electromagnético emitido por el lector

Para que este sistema funcione, el lector emite una potencia, de la cual parte llega al receptor y es reflejada. Con el fin de transmitir datos, una resistencia se conecta en paralelo con la antena y se enciende y se apaga dependiendo del flujo de datos, de tal manera que la potencia reflejada lleva la información a transmitir. La amplitud de señal se puede modular, así que cuando llegue al receptor se podrá separar usando un acoplador direccional para su lectura.

## 2.2.5.2.1.3. Acoplamiento eléctrico

En los sistemas de acoplamiento eléctrico, el lector genera un fuerte campo eléctrico. Su antena consiste en una gran zona eléctricamente conductora (electrodo), por lo general un papel de aluminio o una placa de metal. Si a esta antena se le aplica un voltaje de alta frecuencia, se generara un campo eléctrico de alta frecuencia entre el electrodo y la tierra. El voltaje necesario para esto, que oscila entre unos pocos de cientos de voltios y unos cuantos miles, se generan en

el lector por el aumento del voltaje en un circuito resonante formado por una bobina en el lector, además de la conexión en paralelo de un condensador interno y la capacitancia activa entre el electrodo el potencial de la tierra.

Si el transpondedor se ubica en el campo eléctrico del lector, entonces surge una tensión eléctrica entre los dos electrodos que se utiliza para suministrar energía a los chips del transpondedor.

Si un transpondedor de acoplamiento eléctrico se coloca en la zona de interrogación de un lector, la resistencia de entrada del transpondedor actúa sobre el circuito de resonancia del lector mediante el acoplamiento de la capacitancia entre el lector y los electrodos del transpondedor, modificando el amortiguamiento del circuito resonante ligeramente. El amortiguamiento se puede cambiar entre dos valores, apagando o encendiendo la resistencia de modulación, lo que genera una modulación de amplitud de la tensión presente en el condensador y bobina del lector. Si este apagado y encendido se hace usando los datos, estos datos se pueden transmitir al lector, esto toma el nombre de modulación de carga.

## 2.2.5.2.2.-Sistemas secuenciales

Si la transmisión de datos y la potencia del lector para el soporte de datos se alterna con la transferencia de datos del transpondedor al lector, entonces hablamos de un procedimiento secuencial (SEQ).

### 2.2.5.2.2.1.-Acoplamiento inductivo

Estos sistemas se utilizan exclusivamente en las frecuencias por debajo de 135 KHz. Se genera un acoplamiento tipo transformador entre la bobina del lector y la bobina del transpondedor y la tensión inducida generada en la bobina del transpondedor por el efecto del campo alterno del lector, se rectifica y se puede utilizar como fuente de alimentación.

Con el fin de lograr una mayor eficiencia de transferencia de datos, la frecuencia del transpondedor debe ajustarse con precisión a la del lector y la calidad de la bobina debe ser cuidadosamente especificada. Por esta razón, el transpondedor contiene un condensador de recorte en el chip para compensar las tolerancias de frecuencias de resonancia de fabricación.

A diferencia de los sistemas full y half dúplex, los sistemas secuenciales la transmisión del lector no funciona de forma continua. La energía transferida por el transmisor durante la transmisión carga un condensador de carga para proporcionar una energía de reserva. El chip transmisor se pone en modo stand-by mientras dura la operación de carga, de tal forma que casi toda la energía recibida se utiliza para cargar el condensador. Después de un periodo fijo de carga del transpondedor el emisor se apaga de nuevo.



Figura 2. 18. Tag de acoplamiento inductivo

## 2.2.5.2.2.2. Onda acústica de superficie (SAW)

Los dispositivos de onda acústica de superficie se basan en el efecto piezoeléctrico y en la dispersión de la superficie de las ondas elásticas de baja velocidad. Si un cristal se deforma elásticamente en una dirección determinada, se producen cargas superficiales, dando lugar a tensiones eléctricas en el cristal. Por el contrario, la aplicación de una carga de superficie a un cristal da lugar a una deformación elástica en la cuadrícula del cristal.

Estos dispositivos operan en frecuencias de microondas, normalmente en el rango ISM de 2,45GHz.

Los transductores electroacústicos (transductor interdigital) y los reflectores, se pueden crear utilizando las estructuras de electrodos plana sobre sustratos piezoeléctricos. Una de estas estructuras se coloca en el extremo de un sustrato piezoeléctrico largo y se adjunta a su barra una antena de dipolo adecuada para la frecuencia de funcionamiento.

Un impulso eléctrico aplicado a la barra provoca una deformación mecánica de la superficie del sustrato, debido al efecto piezoeléctrico de los electrodos que se dispersa en todas direcciones en forma de onda. Se colocan electrodos individuales a lo largo de todo el transpondedor y sus bordes forman una banda reflectante que reflejan una pequeña proporción de la superficie de las ondas entrantes.

Un pulso de alta frecuencia de barrido generado por un lector se suministra desde la antena dipolo del transpondedor en el transductor interdigital y se convierte así en una onda acústica de superficie, que fluye a través del sustrato en la dirección longitudinal. La frecuencia de la onda de superficie se corresponde con la frecuencia portadora del pulso de muestreo y esta se corresponde con la frecuencia de transmisión del pulso de muestreo.

Parte de la onda de superficie se refleja en cada una de las bandas reflectantes que se distribuyen en todo el sustrato, mientras que el resto de la onda continúa hasta el final de sustrato y se absorbe.

Las partes reflejadas de la onda vuelven al transductor interdigital, donde se convierten en una secuencia de pulsos de alta frecuencia para ser emitidos por la antena dipolo y se puedan recibir por un lector. El número de impulsos recibidos corresponde con el número de bandas reflectantes en sustrato y el retraso entre pulsos individuales es proporcional a la distancia espacial entre las tiras del reflector sobre el sustrato, por lo que la disposición espacial de estas se puede interpretar como una secuencia binaria de dígitos.



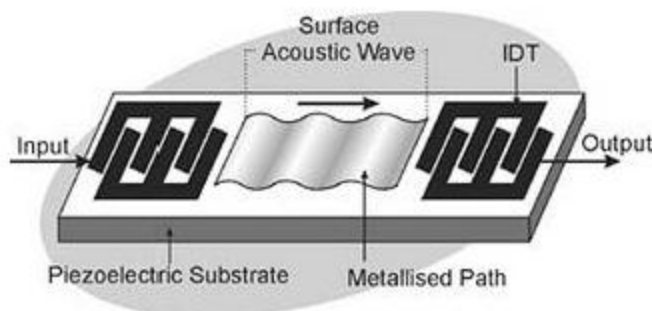


Figura 2. 19. Estructura de un tag SAW

Gracias a la lenta dispersión lenta de las ondas de superficie en el sustrato, el lector recibe la primera respuesta del pulso después de un tiempo muerto de alrededor de 1,5 mseg después de la transmisión del impulso. Esto ofrece grandes ventajas para la recepción del pulso.

La capacidad de almacenamiento de datos y la transferencia de estos a alta velocidad dependerá del tamaño del sustrato y la distancia mínima entre las tiras. En la práctica se transmiten alrededor de 16-32 bits a una velocidad de 500 kbit/s.

El rango de este sistema depende principalmente de la potencia de transmisión del impulso de barrido. En una transmisión a una potencia permitida en la frecuencia de 2,45GHz, se puede esperar un rango de entre 1 y 2 metros.

## 2.2.5.-Lectores

Un lector o interrogador RFID es el dispositivo que proporciona energía a las etiquetas, lee los datos que la etiqueta envía y los envía al sistema de información o base de datos. Además también se encarga de gestionar la secuencia de comunicaciones con el lector.

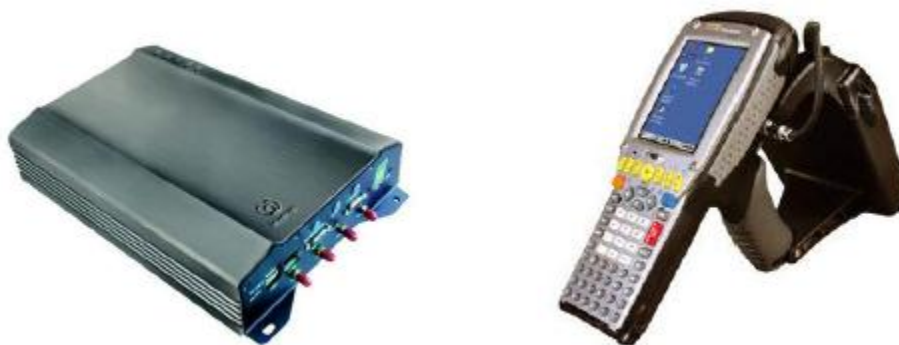


Figura 2. 20. Lectores o Interrogadores RFID

Para llevar a cabo estas funciones el lector tiene que estar equipado con un módulo de radiofrecuencia, una unidad de control y una antena. Además ha de incorporar un interfaz a un PC, host o controlador a través de un enlace local o remoto, Ethernet, WLAN (Bluetooth, Wifi, RS232, etc.), RS232, RS485 para que la información pueda ser enviada a la base de datos. Dependiendo de las necesidades, se presentan tres formas de funcionamiento en lectores RFID.

- a) El lector interroga su zona de cobertura continuamente, es decir, emite un campo electromagnético de forma constante. Este modo de trabajo se utiliza cuando se espera que múltiples etiquetas pasen de forma continua por la zona de cobertura.

- b) El lector interroga la zona de cobertura periódicamente en busca de nuevos dispositivos RFID.
- c) El lector interroga la zona de cobertura de forma puntual, solo cuando debe hacerlo. Este procedimiento se puede llevar a cabo cuando algún otro dispositivo detecta la presencia de una etiqueta, por ejemplo haciendo uso de un sensor.

Hay que decir que ninguno de estos modos de lectura se puede catalogar en términos de más eficaz o mejor, ya que cada uno de ellos se puede amoldar a una situación, por ejemplo, en una tienda en el que esta implantado el sistema EAS, es necesario que el lector este constantemente interrogando para detectar si alguna etiqueta pasa por el arco de seguridad, seria ineficaz aplicar el segundo modo de funcionamiento en estas circunstancias.

El número de etiquetas que es capaz de leer un lector en un segundo depende exclusivamente de la frecuencia de trabajo y del protocolo utilizado, de esta manera, mientras que en la banda de alta frecuencia es capaz de leer 50 tags por segundo, en la banda de ultra alta frecuencia es capaz de leer 200 en ese espacio de tiempo.

A continuación se describen las diferentes partes de un lector previamente mencionadas.

## 2.2.5.1. Modulo de radiofrecuencia

El modulo de radiofrecuencia es la parte de encargada de generar la señal de radiofrecuencia y recibir la que el tag envía con los datos. Por lo tanto se compone básicamente de un emisor para generar esta señal y un receptor para recibir los datos.

Por lo tanto, sus funciones básicas consisten por un lado en generar la señal de radiofrecuencia que alimentara la etiqueta y hará que esta envíe los datos. Por otro lado modulara la transmisión de la señal para poder enviar los datos oportunos al transpondedor y por ultimo recibirá y demodulará las señales que envía el transpondedor.

## 2.2.5.2. Unidad de control

La unidad de control está constituida por un microprocesador que en ocasiones esta acompañado por un circuito integrado ASIC (Application Specific Integrated Circuit) que se adapta a los requerimientos deseados con el fin de quitarle ciertos cálculos al microprocesador. Los circuitos integrados ASIC son circuitos hechos a medida para un uso particular en lugar de haber sido hechos para darle un uso general, de tal manera que ese circuito solo se encontrara en un modelo y no en una amplia gama de productos.

La labor de esta unidad es en primer lugar codificar y decodificar los datos procedentes de las etiquetas y verificar la integridad de los datos almacenados. En segundo lugar gestionar el acceso al medio, lo que supone activar la etiquetas, inicializar la sesión, autenticar y autorizar la transmisión detectar y corregir errores, gestionar el proceso de multilectura, cifrar datos, etc.

Por ultimo tendrá que comunicarse con la base de datos, ejecutando las órdenes recibidas y transmitiendo la información proporcionada por las etiquetas.

Gestionar el acceso al medio es sin duda la labor más delicada que lleva a cabo la unidad de control, ya que usar una tecnología que no requiere contacto físico para la transmisión de información, implica una vulnerabilidad a las interferencias que puede hacer que surjan cambios indeseados en los datos transmitidos y por lo tanto errores en la transmisión. Para



controlar esto se usan ciertos procedimientos basados en la comprobación de bits de paridad, la comprobación de redundancia longitudinal (LRC) y la comprobación de redundancia cíclica (CRC).

## 2.2.5.3. Antena emisora

La antena es el elemento que habilita la comunicación entre el lector y transpondedor y es el componente más sensible de un sistema RFID. La antena debe estar colocada en una posición adecuada, de tal manera que tanto la transmisión de energía hacia la etiqueta, como la recepción de los datos emitidos sean óptimos.

Además, debido a que existen regulaciones gubernamentales que limitan el nivel de potencia de un lector, la ubicación de las antenas es algo fundamental para alcanzar un alto grado de lectura.

Hay tres características de las antenas que contribuyen a la legibilidad de la etiqueta: [2]

- a) **Patrón:** Se refiere al campo de energía tridimensional creada por la antena. Esto es también conocido como el área de lectura.
- b) **Ganancia y atenuación:** La ganancia de la antena de un lector es fijada en relación a las regulaciones gubernamentales. No obstante, la señal puede reducirse o atenuarse para limitar el rango de lectura de la etiqueta o para dirigirla solo a etiquetas que uno desee leer.
- c) **Polarización:** Se refiere a la orientación de la transmisión del campo electromagnético.

La elección de la antena se hace basándose en la frecuencia y la aplicación específica y la mayoría de ellas se engloban en las siguientes categorías:

- a) **Antenas ortogonales:** Un ejemplo típico de estas antenas son las antenas de puerta que se usan en el sistema EAS. Estas antenas dependen mucho menos de la polarización y de la orientación de la antena que otros tipos, aunque estas suelen ser más grande y caras.
- b) **Antenas polarizadas circularmente:** La polarización circular es creada por una antena diseñada para irradiar energía RF en diferentes direcciones simultáneamente. Esta ofrece mayor tolerancia a distintas orientaciones de la etiqueta y una mejor habilidad para evitar obstrucciones, aunque esto implica la reducción del rango del foco de lectura.

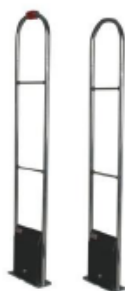


Figura 2. 21. Antena ortogonal



Figura 2. 22. Antena polarizada circularmente

- c) **Antenas polarizadas linealmente:** En general las antenas lineales proveen un rango de lectura más extenso, pero son más sensibles a la orientación de la etiqueta. Habitualmente se utilizan en aplicaciones de lectura automática montadas sobre una cinta transportadora, donde se encuentran los envases con sus correspondientes etiquetas que mantienen una orientación constante para optimizar al máximo su legibilidad.
- d) **Antenas omnidireccionales:** Estas antenas idealmente radian y captan las señales de radiofrecuencia de la misma forma en todas direcciones. Esto supone una ventaja, ya que no hay que direccionar la antena a ninguna zona concreta.



Figura 2. 23. Antena linealmente polarizada



Figura 2. 24. Antena omnidireccional

Las antenas UHF se encuentran generalmente montadas o conectadas de forma externa a través de cables coaxiales y una o más antenas se pueden conectar a un lector, dependiendo de cómo queramos trabajar con el.

Otro de los aspectos importantes a la hora de elegir una antena es el área de cobertura que requiere esa aplicación, de tal manera que tiene que ser lo suficientemente grande como para detectar las etiquetas, pero lo suficientemente pequeñas como para evitar lecturas no válidas.

Para dotar al sistema de una cobertura adecuada hay ciertas cosas a tener en cuenta, en primer lugar la orientación de la antena del lector con respecto a la etiqueta, que influye significativamente en la cantidad de potencia transferida al tag. Aunque en principio las

etiquetas pueden ser leídas en todas las orientaciones, generalmente el campo producido la antena tiene una dirección determinada, algo que afecta especialmente en AF y UHF.

Esto puede dificultar la lectura, llegando incluso a imposibilitarla, por eso es importante buscar el acoplamiento óptimo ente ambas y en caso de que no se pueda controlar la posición de la etiqueta, compensarlo diseñando adecuadamente la antena.

La pérdida de sintonía o la debilitación de la señal puede ocurrir por los siguientes factores:

- a) Pérdidas debido a la proximidad de metales o líquidos
- b) Pérdida del cableado de la antena
- c) Pérdida de señal
- d) Proximidad con otros lectores/antenas
- e) Variaciones ambientales
- f) Interferencia desde otras fuentes RF
- g) Campos de corriente
- h) Refracción de la señal
- i) Diálogos cruzados

Algunos de estos efectos se pueden compensar a través de la sintonía dinámica, introduciendo circuitos en el lector que trabajan con retroalimentación de la antena o circuitos dinámicos autosintonizadores.

## 2.2.6.-Bandas de frecuencia RFID

Resulta obvio que al configurar un sistema de RFID tanto el lector como el tag tienen que trabajar a la misma frecuencia porque si no su comunicación sería inviable, por eso es importante tener claro a que frecuencias trabaja el sistema RFID y cada tag.

Como ya se ha mencionado previamente, las frecuencias disponibles se dividen en nueve bandas de frecuencia diferente. De esta manera, el sistema se define en tres rangos de frecuencia diferentes, frecuencias bajas (Low Frequency o LF), frecuencias altas (High Frequency o HF), frecuencias ultra altas (Ultra High Frequency o UHF) y microondas.

Los sistemas RFID trabajan en bandas libres exceptuando los de frecuencia baja, que al ser inferior a 133 KHz no es libre, pero su utilización está permitida porque utilizan el campo magnético para operar que no interfiere con ningún otro dispositivo.

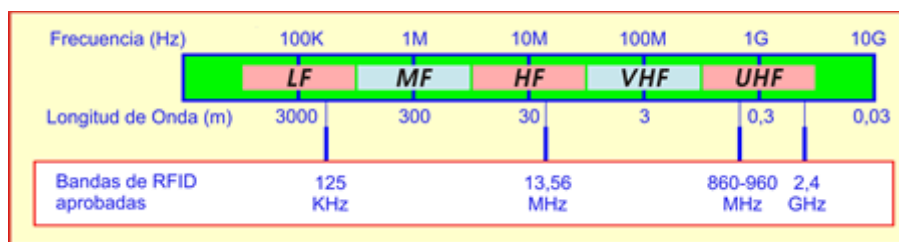


Figura 2. 25. Frecuencias que utiliza el sistema RFID [13]

### 2.2.6.1.-Sistemas de baja frecuencia (LF)

Estas etiquetas trabajan a frecuencias inferiores a 135 KHz y para su funcionamiento hacen uso del acoplamiento inductivo. Generalmente las frecuencias bajas implican una tasa de transferencia de datos baja, en este caso se sitúan entre 200bps y 1 kbps.

Las etiquetas pasivas suelen tener una cobertura pequeña que alcanza como mucho los 0,5 metros, las etiquetas pasivas en cambio pueden llegar a los dos metros. Estos campos magnéticos tan pequeños son debidos a que el sistema es inductivo y por lo tanto trabaja con campos magnéticos. Este decrece rápidamente con la distancia y con las dimensiones de la antena.

Aunque esto no tiene por qué ser una desventaja, ya que resulta idóneo cuando la aplicación requiere de zonas de cobertura limitadas a un área pequeña. En lo que al coste se refiere, las etiquetas de estos sistemas son más caras que las de otros sistemas de frecuencias más elevadas, por los componentes que se utilizan en su fabricación. Aunque por otro lado la construcción del chip y el encapsulado es más barato y además los lectores y programadores son simples lo que implica un coste de fabricación menor.

### 2.2.6.2.-Sistemas de alta frecuencia (HF)

Estos sistemas pueden trabajar en la frecuencia de 6,78MHz, 13,56MHz, 27,125MHz y 40,68MHz. En este caso también se basan principalmente en el acoplamiento para funcionar.

En lo que a capacidad se refiere, oscilan entre los 512 bits y los 8 kbits y la velocidad de transmisión de datos es de unos 25Kbps, aunque existen dispositivos con tasas de 100Kbps. Estos sistemas RFID son capaces de leer 40 etiquetas aproximadamente.

Estos sistemas poseen una buena penetración en materiales y líquidos no conductores, aunque no funcionan cuando están cerca de materiales metálicos por las reflexiones que estos pueden producir.

Otro de los problemas que muestran los sistemas que trabajan a estas frecuencias es la orientación de la etiqueta según aumenta la distancia. Esto es debido a las características vectoriales de la antena y se puede solucionar usando antenas de transmisión más complejas.

### 2.2.6.3.-Sistemas de ultra alta frecuencia (UHF)

Estos sistemas pueden trabajar a 433MHz, 860MHz o 928 MHz y a diferencia de los de alta y baja frecuencia, estos basan su funcionamiento en la propagación de ondas electromagnéticas o dicho de otra manera, en el acoplamiento capacitivo.

Las capacidades de este sistema van desde los 32 bits hasta los 4 Kbits tanto para etiquetas activas como para etiquetas pasivas. La velocidad de transferencia de datos es de unos 28 Kbps, aunque se pueden alcanzar velocidades mayores y permiten la lectura de unas 100 etiquetas por segundo.

El tipo de etiqueta influye en las distancias que puede alcanzar el sistema, de tal manera que trabajando con etiquetas pasivas la distancia máxima alcanzable es de unos tres o cuatro metros y haciendo uso de etiquetas activas a la frecuencia más baja de esta banda, se pueden alcanzar los diez metros.

Posee una buena penetración tanto en materiales conductores como no conductores, aunque muestra problemas con los líquidos. Una desventaja es que otros sistemas trabajan en la frecuencia de UHF (Por ejemplo la televisión) y esto puede generar interferencias.

Los costes dependen de la forma que adquieran los transpondedores, aunque estos tags fabricados en grandes cantidades pueden llegar a ser más baratos que los que trabajan a frecuencias más bajas.

## 2.2.6.4.-Sistemas de microondas

Estos sistemas trabajan a la frecuencia de 2,5 GHz y trabaja a velocidades elevadas, típicamente por debajo de los 100 kbps, aunque algunos dispositivos pueden alcanzar 1 Mbps de velocidad de transmisión. En lo que a capacidad se refiere, suelen tener una capacidad mínima de 128 bits y una máxima de 512 Kbits.

Su rango de trabajo es bastante amplio, los dispositivos pasivos son capaces de transmitir información entre 1 y 2 metros y los dispositivos activos pasan los 15 metros.

Este sistema posee una buena penetración en materiales no conductores, a diferencia de en los líquidos, donde el coeficiente de absorción juega un gran papel. Por otro lado en los metales y otras superficies conductoras se refleja. Además tiene el inconveniente de trabajar en una banda compartida.

Se puede considerar que este sistema es apto para aplicaciones que necesitan de una alta cobertura y de velocidades de transmisión elevadas.

## 2.3. Tecnología ZigBee

En este apartado se tratará de forma amplia y específica el funcionamiento de este tipo de medio inalámbrico, partiendo de una definición de ZigBee y posteriormente estudiando tanto sus principales características como su funcionamiento en una red ZigBee.

### 2.3.1. Definición de ZigBee

ZigBee es el nombre de la especificación de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radios digitales de bajo consumo, basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (wireless personal area network, WPAN).[6][7]

Su objetivo son las aplicaciones para redes Wireless que requieran comunicaciones seguras y fiables con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías. Todo basado en un estándar público global que permita a cualquier fabricante crear productos que sean compatibles entre ellos.

La red, en su conjunto, utiliza una cantidad muy pequeña de energía de forma que cada dispositivo individual pueda tener una autonomía de hasta 5 años antes de necesitar un recambio en su sistema de alimentación.

El medio de transmisión ZigBee trabaja sobre la banda ISM. Éstas son reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia electromagnética en áreas industrial, científica y médica. Las bandas ISM son definidas por la ITU en el artículo 5 de las Regulaciones Radio (RR), concretamente puntos 5.138 y 5.150.

La pila de protocolos ZigBee, también conocida como ZigBee Stack, se basa en el nivel físico (PHY) y el control de acceso al medio (MAC) definidos en el estándar IEEE 802.15.4, que desarrolla estos niveles para redes inalámbricas de área personal de baja tasa de transferencia (LR-WPAN, Low Rate - Wireless Personal Area Network).

La especificación ZigBee completa este estándar añadiendo cuatro componentes principales:

- Nivel de red.
- Nivel de aplicación.
- Objetos de dispositivo ZigBee (ZDO, ZigBee Device Objects).
- Objetos de aplicación definidos por el fabricante.

Además de añadir dos capas de alto nivel (nivel de red y de aplicación) a la pila de protocolos, es importante la adición de los ZDO, responsables de llevar a cabo una serie de cometidos, entre los que se encuentran el mantenimiento de los roles de los dispositivos, la gestión de peticiones de unión a una red, el descubrimiento de otros dispositivos y la seguridad.

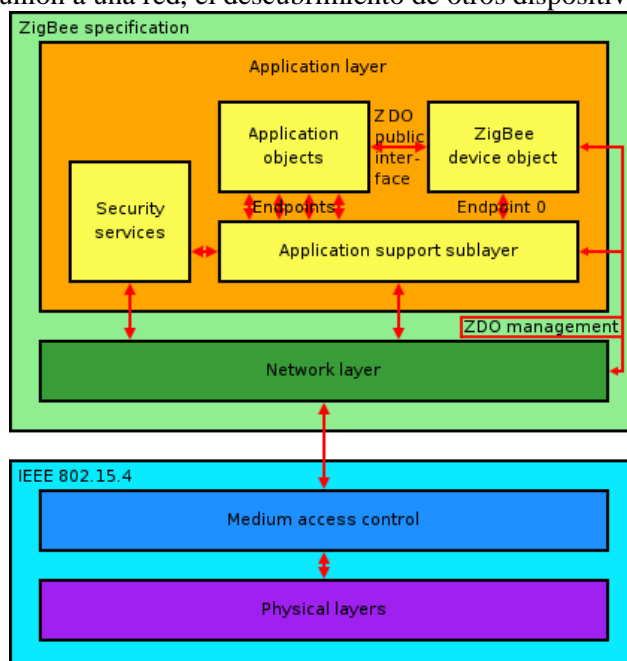


Figura 2. 26. Pila de protocolos ZigBee [14]

## 2.3.2. Descripción general

El estándar IEEE 802.15.4 [6] define las características de la capa física y de la capa de control de acceso al medio (MAC) para redes inalámbricas de área personales (WPAN, *Wireless Personal Area Networks*) de baja tasa de transmisión. Las ventajas de utilizar el estándar IEEE 802.15.4 es que permite la utilización de dispositivos de fácil instalación que proveen transmisiones confiables a distancias cortas a un precio muy bajo. Por otro lado, el estándar IEEE 802.15.4 permite proporcionar un tiempo de vida razonable al utilizar fuentes de energía limitada (por ejemplo, las baterías alcalinas) y al mismo tiempo proporciona una pila de protocolo que es simple y sencilla. [7]

Las características generales del estándar de comunicación IEEE 802.15.4, son:

- a) Tasas de transferencias de 250Kb/S, 40Kb/S y 20Kb/S.
- b) Direccionamiento corto con 16 bits y extendido con 64 bits.
- c) Garantía del manejo de las ranuras de tiempo (GTS, *guaranteed time slot*).
- d) Detección de los niveles de energía recibidos (ED, *energy detection*).
- e) Indicadores de calidad en el enlace así como de conmutación de canales para recibir paquetes (LQI, *link quality indication*).
- f) Acceso al canal por CSMA-CA (CCA, *clear channel assessment*).

El estándar de comunicaciones IEEE 802.15.4 tiene dos tipos de dispositivos que participan en la red: dispositivo con todas las funciones (FFD, *Full Function Device*) y dispositivo con funciones reducidas (RFD, *Reduced Function Device*), como se verá en el apartado 2.3.2.2.

Dependiendo de la aplicación a utilizar, el estándar permite operar en distintas topologías.

Éste estándar no establece un nivel de red pero si plantea parámetros para su implementación. El funcionamiento de la red depende de su configuración, debido a que una LR-WPAN puede utilizar uno de los dos mecanismos de acceso a los canales: sin *Beacon* y con *Beacon*.

## 2.3.3. Tipos de dispositivos

Se definen tres tipos distintos de dispositivo ZigBee según su papel en la red: [7]

1. Coordinador ZigBee (ZigBee coordinator, ZC). El tipo de dispositivo más completo. Puede actuar como director de una red en árbol así como servir de enlace a otras redes. Existe exactamente un coordinador por cada red, que es el nodo que la comienza en principio. Puede almacenar información sobre la red y actuar como su centro de confianza en la distribución de claves de cifrado.
2. Router ZigBee (ZR). Además de ofrecer un nivel de aplicación para la ejecución de código de usuario, puede actuar como router interconectando dispositivos separados en la topología de la red.
3. Dispositivo final (ZigBee end device, ZED). Posee la funcionalidad necesaria para comunicarse con su nodo padre (el coordinador o un router), pero no puede transmitir información destinada a otros dispositivos. De esta forma, este tipo de nodo puede estar dormido la mayor parte del tiempo, aumentando la vida



media de sus baterías. Un ZED tiene requerimientos mínimos de memoria y es por tanto significativamente más barato.

En base a su funcionalidad puede plantearse una segunda clasificación:

1. *Dispositivo de funcionalidad completa* (FFD): es capaz de recibir mensajes en formato del estándar 802.15.4. Gracias a la memoria adicional y a la capacidad de computar, puede funcionar como coordinador o router o puede ser usado en dispositivos de red que actúen de interface con los usuarios.
2. *Dispositivo de funcionalidad reducida* (RFD): tiene capacidad y funcionalidad limitadas (especificada en el estándar) con el objetivo de conseguir un bajo coste y una gran simplicidad. Básicamente, son los sensores/actuadores de la red.

## 2.3.4. Arquitectura

ZigBee es una pila de protocolos, que de manera similar al modelo OSI esta constituido por diferentes capas, las cuales son independientes una de la otra. En la figura 2 se muestran las diferentes capas que conforman la pila de protocolos para ZigBee. [7]

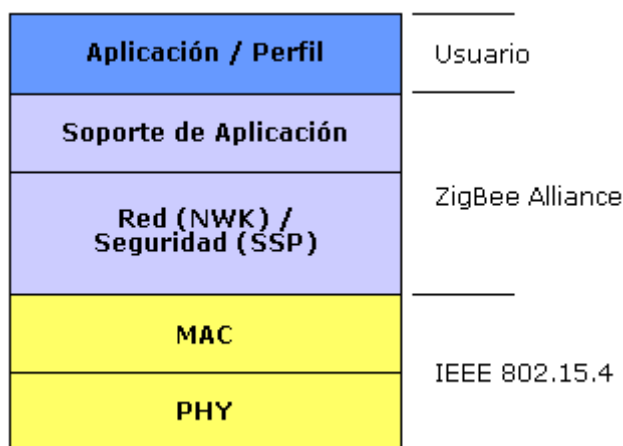


Figura 2. 27. Capas que componen el sistema ZigBee [15]

- La capa de más bajo nivel es la capa física (PHY), que en conjunto con la capa de acceso al medio (MAC), brindan los servicios de transmisión de datos por el aire, punto a punto. Estas dos capas esta descritas en el estándar IEEE 802.15.4–2003. El estándar trabaja sobre las bandas ISM de uso no regulado, dónde se definen hasta 16 canales en el rango de 2.4 GHz, cada una de ellas con un ancho de banda de 5 MHz. Se utilizan radios con un *espectro de dispersión de secuencia directa*, lográndose tasas de transmisión en el aire de hasta 250 Kbps en rangos que oscilan entre los 10 y 75 m, los cuales dependen bastante del entorno.
- La capa de red (NWK) tiene como objetivo principal permitir el correcto uso del subnivel MAC y ofrecer una interfaz adecuada para su uso por parte de la capa de aplicación. En esta capa se brindan los métodos necesarios para: iniciar la red, unirse a la red, enrutar paquetes dirigidos a otros nodos en la red, proporcionar los medios para garantizar la entrega del paquete al destinatario final, filtrar paquetes recibidos, cifrarlos y autentificarlos. Se debe tener en

cuenta que el algoritmo de enrutamiento que se usa es el de *enrutamiento de malla*, el cual se basa en el protocolo *Ad Hoc On-Demand Vector Routing – AODV*. Cuando esta capa se encuentra cumpliendo la función de unir o separar dispositivos a través del controlador de red, implementa seguridad, y encamina tramas a sus respectivos destinos; además, la capa de red del controlador de red es responsable de crear una nueva red y asignar direcciones a los dispositivos de la misma. Es en esta capa en donde se implementan las distintas topologías de red que ZigBee soporta (árbol, estrella y mesh network).

- La siguiente capa es la de soporte a la aplicación que es el responsable de mantener el rol que el nodo juega en la red, filtrar paquetes a nivel de aplicación, mantener la relación de grupos y dispositivos con los que la aplicación interactúa y simplificar el envío de datos a los diferentes nodos de la red. La capa de Red y de soporte a la aplicación son definidas por la ZigBee Alliance.
- En el nivel conceptual más alto se encuentra la capa de aplicación que no es otra cosa que la aplicación misma y de la que se encargan los fabricantes. Es en esta capa donde se encuentran los ZDO (ZigBee Device Objects) que se encargan de definir el papel del dispositivo en la red, si el actuará como coordinador, como router o dispositivo final; la subcapa APS y los objetos de aplicación definidos por cada uno de los fabricantes.

Cada capa se comunica con sus capas subyacentes a través de una interface de datos y otra de control, las capas superiores solicitan servicios a las capas inferiores, y éstas reportan sus resultados a las superiores. Además de las capas mencionadas, a la arquitectura se integran otro par de módulos: *módulo de seguridad*, que es quien provee los servicios para cifrar y autenticar los paquetes, y el *módulo de administración del dispositivo ZigBee*, que es quien se encarga de administrar los recursos de red del dispositivo local, además de proporcionar a la aplicación funciones de administración remota de red.

## 2.3.5. Empaquetamiento y Direccionamiento

En ZigBee, el empaquetamiento se realiza en cuatro tipos diferentes de paquetes básicos, los cuales son: datos, ACK, MAC y baliza. En la figura 3 se muestra los campos de los cuatro tipos de paquetes básicos.

El paquete de datos tiene una carga de datos de hasta 104 bytes. La trama esta numerada para asegurar que todos los paquetes lleguen a su destino. Un campo nos asegura que el paquete se ha recibido sin errores. Esta estructura aumenta la fiabilidad en condiciones complicadas de transmisión.

La estructura de los paquetes ACK, llamada también *paquete de reconocimiento*, es dónde se realiza una realimentación desde el receptor al emisor, de esta manera se confirma que el paquete se ha recibido sin errores. Se puede incluir un *tiempo de silencio* entre tramas, para enviar un pequeño paquete después de la transmisión de cada paquete.

El paquete MAC, se utiliza para el control remoto y la configuración de dispositivos/nodos. Una red centralizada utiliza este tipo de paquetes para configurar la red a distancia.

El paquete baliza se encarga de “despertar” los dispositivos que “escuchan” y luego vuelven a “dormirse” si no reciben nada más. Estos paquetes son importantes para mantener

todos los dispositivos y los nodos sincronizados, sin tener que gastar una gran cantidad de batería estando todo el tiempo encendidos.



Figura 2. 28. Campos de los cuatro tipos de paquetes básicos de ZigBee. [16]

Por otra parte, el direccionamiento es, a su vez, parte del nivel de aplicación. Un nodo está formado por un transceptor de radio compatible con el estándar 802.15.4 dónde se implementan dos mecanismos de acceso al canal y una o más descripciones de dispositivo (colecciones de atributos que pueden consultarse o asignarse, o se pueden monitorizar por medio de eventos). El transceptor es la base del direccionamiento, mientras que los dispositivos dentro de un nodo se identifican por medio de un *endpoint* numerado entre 1 y 240.

Los dispositivos se direccionan empleando 64-bits y un direccionamiento corto opcional de 16 bits. El campo de dirección incluido en MAC puede contener información de direccionamiento de ambos orígenes y destinos (necesarios para operar punto a punto). Este doble direccionamiento es usado para prevenir un fallo dentro de la red.

Los dos mecanismos de acceso al canal que se implementan en ZigBee corresponden para redes “con balizas” y “sin balizas”. Para una red “sin balizas”, un estándar ALOHA CSMA-CA envía reconocimientos positivos para paquetes recibidos correctamente. En esta red, cada dispositivo es autónomo, pudiendo iniciar una conversación, en la cual los otros pueden interferir. A veces, puede ocurrir que el dispositivo destino puede no oír la petición, o que el canal esté ocupado.

Este sistema se usa típicamente en los sistemas de seguridad, en los cuales sus dispositivos (sensores, detectores de movimiento o de rotura de cristales), duermen prácticamente todo el tiempo (el 99,999%). Para que se les tenga en cuenta, estos elementos se “despiertan” de forma regular para anunciar que siguen en la red. Cuando se produce un evento, el sensor “despierta” instantáneamente y transmite la alarma correspondiente. Es en ese momento cuando el coordinador de red, recibe el mensaje enviado por el sensor, y activa la alarma correspondiente. En este caso, el coordinador de red se alimenta de la red principal durante todo el tiempo.

En cambio, en una red “con balizas”, se usa una estructura de *supertrama* para controlar el acceso al canal, esta *supertrama* es estudiada por el coordinador de red para transmitir “tramas baliza” cada ciertos intervalos (múltiples cada de 15.38 ms hasta cada 52 s). Esta estructura garantiza el ancho de banda dedicado y bajo consumo. Este modo es más recomendable cuando el coordinador de red trabaja con una batería. Los dispositivos que conforman la red, escuchan a dicho coordinador durante el

"balizamiento" (envío de mensajes a todos los dispositivos -broadcast-, entre 0,015 y 252 segundos). Un dispositivo que quiera intervenir, lo primero que tendrá que hacer es registrarse para el coordinador, y es entonces cuando mira si hay mensajes para él. En el caso de que no haya mensajes, este dispositivo vuelve a "dormir", y se despierta de acuerdo a un horario que ha establecido previamente el coordinador. En cuanto el coordinador termina el "balizamiento", vuelve a "dormirse".

Otro aspecto muy importante es la seguridad de las transmisiones y de los datos, los cuales son puntos clave en la tecnología ZigBee que utiliza el modelo de seguridad de la subcapa MAC IEEE 802.15.4, la cual especifica 4 servicios de seguridad:

- Control de accesos, el dispositivo mantiene una lista de dispositivos "comprobados" en la red.
- Datos encriptados, las cuales utilizan una encriptación con un código de 128 bits.
- Integración de tramas, para proteger los datos de ser modificados por otros.
- Secuencias de refresco, para comprobar que las tramas no han sido remplazadas por otras. El controlador de red comprueba estas tramas de refresco y su valor, para ver si son las esperadas.

## 2.3.6. Topologías

En ZigBee existen tres tipos de topologías: estrella, árbol, y en red mallada (mesh network), las cuales pueden observarse en la figura 4. Siempre hay un nodo de red que asume el papel de coordinador central encargado de centralizar la adquisición y las rutas de comunicación entre dispositivos. Además, si se aplica el concepto de Mesh Network, pueden existir coordinadores o routers, alimentados permanentemente en espera de recibir/repetir las tramas de los dispositivos o sensores. Ambos dispositivos son del tipo FFD (Full Functionality Device), debido a que exigen empujar la mayoría de primitivas definidas por el stack ZigBee.

Los dispositivos que harán la función de sensores, termostatos o mandos a distancia serán de funcionalidad reducida (RFD, Reduced Functionality Device), y serán alimentados por baterías o pilas.

Sin lugar a dudas, una de las mayores aportaciones del ZigBee y el que mayor interés está despertando a las empresas desarrolladoras de productos, es el concepto de red nodal o mesh network por el que cualquier dispositivo ZigBee puede conectarse con otro dispositivo usando a varios de sus compañeros como repetidores. A este se le conoce como enrutado "multi-salto", primero hace llegar la información al nodo ZigBee vecino, el cual puede además ser coordinador de la red, para así llegar al nodo destino, pasando por todos los que sean necesarios. De esta manera cualquier nodo ZigBee puede hacer llegar los datos a cualquier parte de la red inalámbrica siempre y cuando todos los dispositivos tengan un vecino dentro de su rango de cobertura.

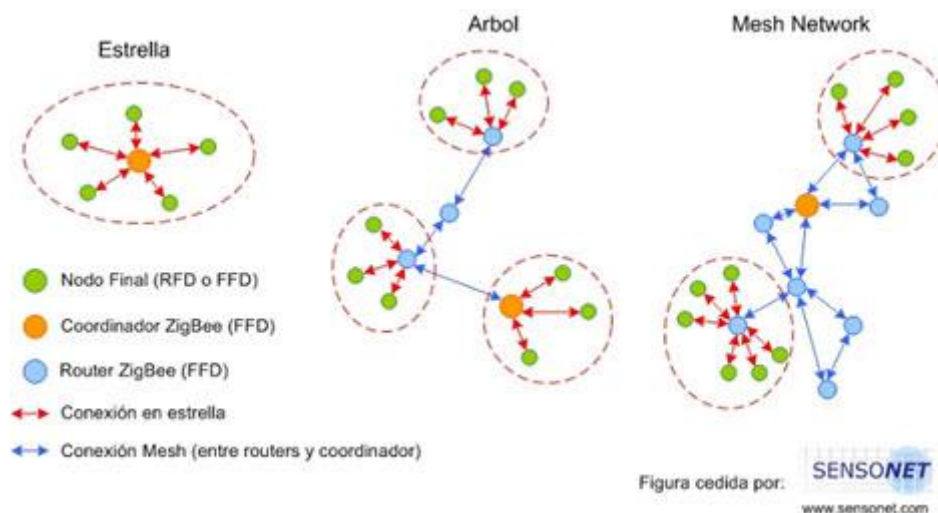


Figura 2. 29. Diferentes topologías de red disponibles en ZigBee. [17]

### 2.3.6.1. Topología en estrella

En redes en estrella el coordinador de red, llamado coordinador PAN, se sitúa en el centro, y toda conexión que se quiera realizar entre los distintos nodos de la red debe pasar por éste. Éste nodo central activo dispone de los medios necesarios para prevenir problemas, ya que por él circulan todos los paquetes de las distintas conexiones entre módulos. En la figura 8 vemos ilustrada la típica estructura de una red en estrella.

#### Star Topology Network

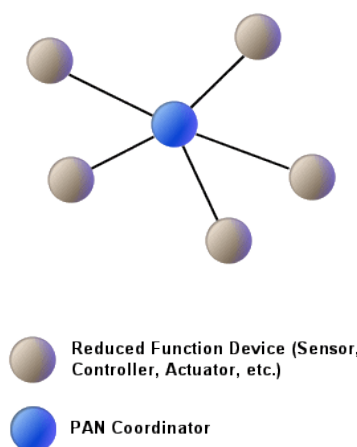


Figura 2. 30. Topología en estrella [18]

La alimentación de los dispositivos finales puede ser por baterías mientras que el coordinador debe estar directamente conectado a través de la red eléctrica ya que su consumo es mucho mayor.

Las ventajas que nos puede aportar una red en estrella sería la facilidad a la hora de implementarla, adecuada para redes temporales, el fallo de un nodo periférico no influiría en el comportamiento del resto de la red y no hay problemas con colisiones de datos ya que cada estación tiene su propia conexión al coordinador central.

En contrapartida, la utilización de una red en estrella nos limita el número de nodos que pueden estar conectados a la red. También se debe tener muy en cuenta que los costes de mantenimientos pueden aumentar a largo plazo, y que el fallo del nodo central puede echar abajo la red entera.

Otro problema de esta configuración es que la expansión de la red está muy limitada puesto que el rango de alcance del coordinador es el que define el tamaño de la red.

A causa de todo ello, podemos confirmar que una red en estrella puede ser poco fiable en el momento de realizar transferencias de información.

## 2.3.6.2. Topología en árbol

Topología de red en la que los nodos están colocados como su propio nombre indica en forma de árbol.

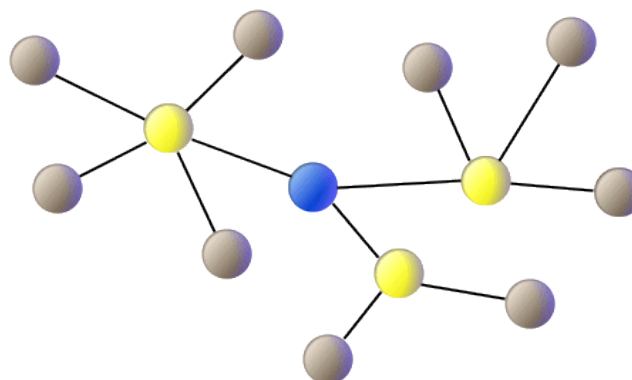
Para este tipo de topología el coordinador será la raíz del árbol. Desde una vista topológica, la conexión en árbol es parecida a una serie de redes en estrella interconectadas, salvo en que no tiene un nodo central. En cambio, tiene un nodo de enlace troncal, desde el que se ramifican los demás nodos.

En este tipo de redes se permite el uso de router ZigBee para interconectar los distintos nodos de la red. Así mismo, la comunicación en árbol es estrictamente jerárquica con lo que puede utilizar opcionalmente tramas balizas. Un fallo de un nodo no implica la interrupción en las comunicaciones. Se comparte el mismo canal de comunicaciones.

Los problemas asociados a este tipo de topología radican en que los datos son recibidos por todas las estaciones sin importar para quien vayan dirigidos. Por lo tanto es necesario dotar a la red de un mecanismo que permita identificar al destinatario de los mensajes. Además, debido a la presencia de un medio de transmisión compartido entre muchos dispositivos, pueden producirse interferencias entre las señales cuando dos o más transmitan al mismo tiempo. La solución al primero de estos problemas aparece con la introducción de un identificador de módulo destino. Para darle solución al segundo problema, hay que mantener una coordinación entre todos los nodos, y para eso se utiliza cierta información de control en las tramas que controlan quien transmite en cada momento, utilizando tramas balizas mencionadas anteriormente.



## Cluster Network






-  Reduced Function Device (Sensor, Controller, Actuator, etc.)
-  PAN Coordinator
-  Full Function Device (Performs network routing functions)

Figura 2. 31. Topología en árbol [18]

### 2.3.6.3. Topología igual a igual (peer to peer)

En este tipo de red se puede establecer comunicación directa entre cualquier par de nodos. El coordinador no realiza funciones muy diferentes a las que realizan el resto de routers de la red; de hecho, la función de coordinador la realiza el primer router que forme parte de la red. Al no depender de un único dispositivo para gestionar la red, la fiabilidad de esta configuración es mayor.

En la topología *peer to peer* ganamos en flexibilidad a costa de aumentar la complejidad. Esto se debe a que para comunicar cualquier par de dispositivos hay más de un camino posible. La elección de dicho camino conlleva un aumento de computación que debe realizarse a nivel de red. Por lo tanto, estas consideraciones no se tienen en cuenta en la especificación del IEEE 802.15.4 si no que se definen en la especificación de ZigBee.

Esta topología solo tiene un coordinador PAN, sin embargo, es diferente de la topología estrella debido a que cualquier dispositivo puede comunicarse con cualquier otro mientras la distancia entre ellos esté en el rango de comunicación directa. La topología *peer to peer* permite formaciones de redes más complejas, tales como las topologías tipo *mall*a (*mesh*) o árbol de clúster (*clustertree*).



## Peer to Peer Network

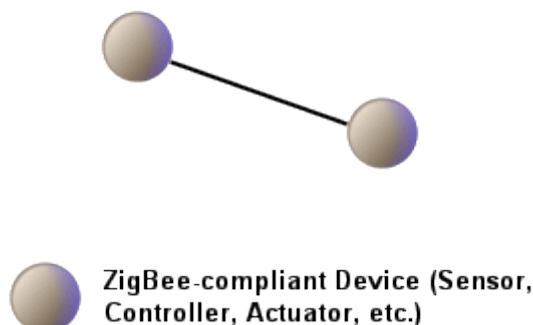


Figura 2. 32. Topología Peer to Peer [18]

### 2.3.6.4. Topología en malla

La topología más interesante es la topología de malla. Consiste en que al menos uno de los nodos tendrá más de dos conexiones. Con ello conseguimos que si en un momento dado, un nodo del camino falla y se cae, pueda seguir la comunicación entre todos los demás nodos debido a que se rehacen todos los caminos.

El establecimiento de una red de malla es una manera de encaminar datos, voz e instrucciones entre los nodos. Las redes de malla se diferencian de otras redes en que las piezas de la red (los nodos) están conectadas unas con otras por uno u otro camino. Esta configuración ofrece caminos redundantes por toda la red, de modo que si falla una conexión, otra se hará cargo del tráfico.

Esta topología, a diferencia de las vistas en apartados anteriores, no requiere de un servidor o nodo central, con lo que se reduce el mantenimiento. Un error en un nodo, sea importante o no, no implica la caída de toda la red.

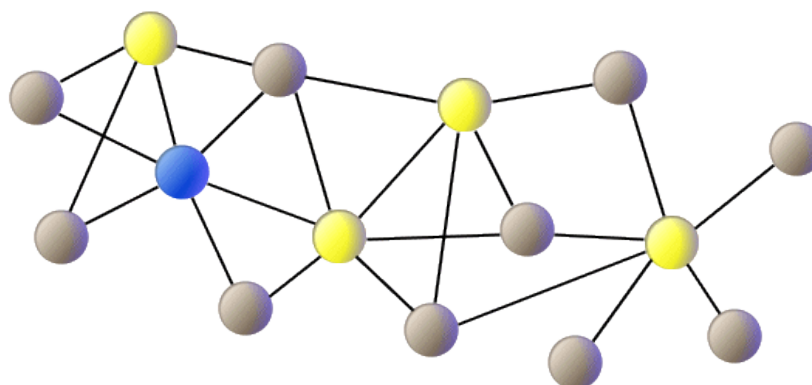
Las redes de malla se autogeneran, es decir, la red puede funcionar incluso cuando un nodo desaparece o la conexión falla, ya que el resto de nodos evitan el paso por ese punto. Consecuentemente, se forma una red muy confiable.

Gracias a las estructuras arbitrarias que permite la topología en malla, figura, es posible llevar los mensajes de un nodo a otro por diferentes caminos. A consecuencia de este tipo de estructura no se pueden usar tramas balizas.

Estas redes permiten el uso de routers ZigBee para habilitar la comunicación en el nivel de red. Estos no son Coordinadores ZigBee, pero pueden serlo de sus respectivos espacios de operación personal definidos por 802.15.4.

Aunque la facilidad de solución de problemas y el aumento de la fiabilidad son ventajas muy interesantes, estas redes resultan más caras de instalar.

## Mesh Network






-  Reduced Function Device (Sensor, Controller, Actuator, etc.)
-  PAN Coordinator
-  Full Function Device (Performs network routing functions)

Figura 2. 33. Topología en Malla [18]

## 3. Análisis del Funcionamiento en un Entorno Comercial

Este proyecto se basa en el estudio del comportamiento de los sistemas RFID y ZigBee en entornos comerciales. Se utilizarán varios métodos de análisis para comprobar el correcto funcionamiento de estos.

Inicialmente, mediante cálculos analíticos se realizará una estimación de la pérdida básica de propagación y de intensidad de campo. Su uso rápido y sencillo nos ofrece una aproximación bastante básica del comportamiento de RFID y ZigBee en un entorno comercial.

Una vez realizados los cálculos analíticos se procederá a un análisis determinista más completo y preciso. Este análisis consistirá en el trazado de rayos, que se describirá en los siguientes apartados.

### 3.1. Resultados Preliminares Analíticos

Los resultados analíticos no ofrecen la posibilidad de obtener una primera estimación del problema a tratar. Sus ventajas son su sencillez y rapidez para obtener resultados, su desventaja es que los resultados obtenidos son poco precisos.

A continuación se presentan los modelos analíticos utilizados tanto para RFID como para ZigBee.

#### 3.1.1 RFID

Para el modelo RFID se han implementado dos modelos (dos aproximaciones), el primero de ellos es muy sencillo y nos aporta poca información.

El segundo modelo es más completo, nos ofrece diferentes resultados dependiendo de la altura del lector y de la etiqueta.

##### 3.1.1.1. Primera aproximación

$$\begin{aligned} P_{r,reader} \text{ (dBm)} \\ = P_{reader} \text{ (dBm)} + 2G_{reader} \text{ (dB)} - L_{sys} \text{ (dB)} \\ + 10\log\left(\frac{RCS}{4\pi}\right) + 20\log\left(\frac{\lambda}{4\pi}\right) - 40\log r \end{aligned}$$

- $P_{reader}$  es la potencia transmitida por el lector.
- $G_{reader}$  y  $G_{tag}$  son las ganancias del lector y de la etiqueta RFID respectivamente.

Material	$G_{\text{tag}}$ (dB)
Espacio libre	2.14
Madera (20mm)	0.82
Botella de vidrio (con agua)	-18.41
Metal (15mm)	3.91

Figura 3. 1. Valores típicos de ganancia de etiqueta para distintos materiales

- $L_{\text{sys}}$  son las pérdidas del cable.
- $\rho$  es el coeficiente de reflexión de la etiqueta RFID y viene dado por la expresión:

$$\rho = \frac{Z_{\text{antena}} - Z_{\text{load}}}{Z_{\text{antena}} + Z_{\text{load}}}$$

Dónde  $Z_{\text{antena}}$  es la impedancia de entrada de la antena y  $Z_{\text{load}}$  es la impedancia del circuito integrado.

- $r$  es la distancia entre el lector y la etiqueta.
- $\lambda$  es la longitud de onda.
- RCS (Radar Cross-Section) es el parámetro que determina la potencia de la señal modulada reflejada en la etiqueta. [19]

$$\text{RCS} = G_{\text{tag}}^2 \frac{\lambda^2}{4\pi} |\rho'|^2$$

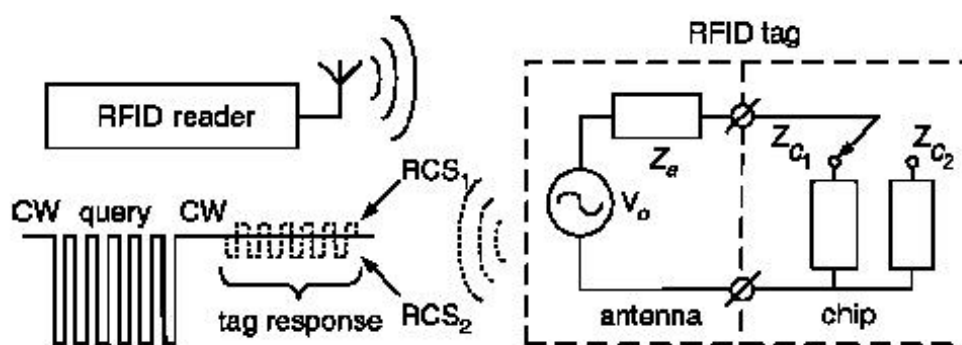
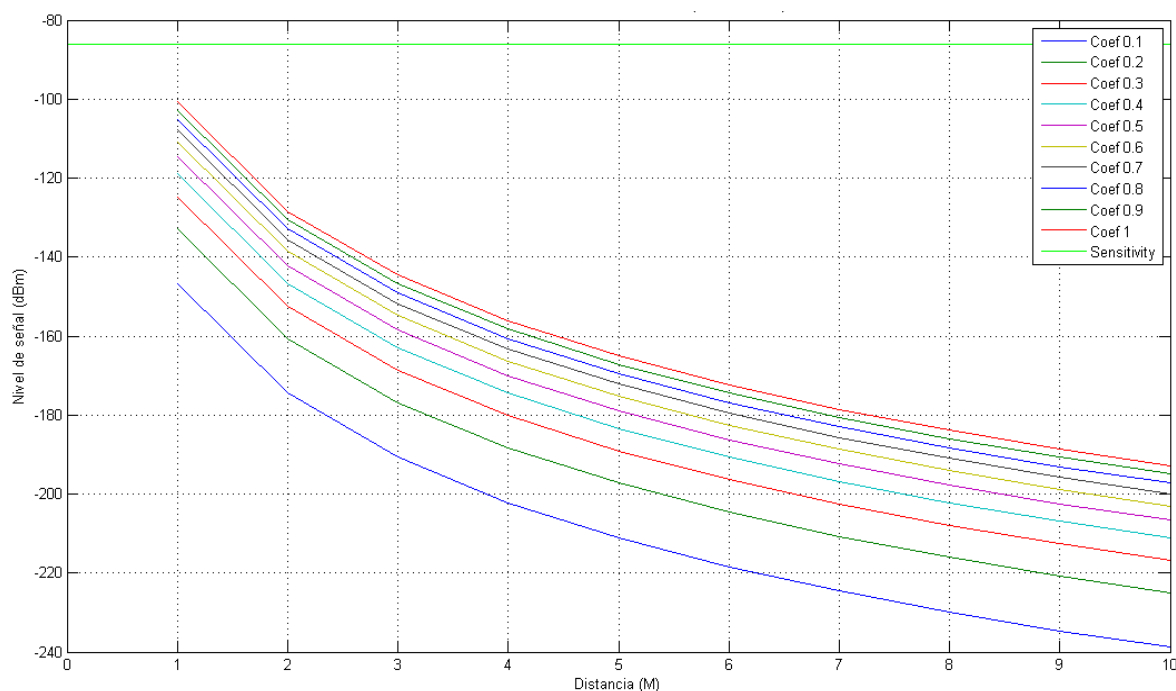


Figura 3. 2. Sistema RFID pasivo y circuito equivalente de la etiqueta [19]

- $\rho' = \rho_1 - \rho_2$  donde  $\rho_1 - \rho_2$  que son los coeficientes de reflexión del chip, que dependen de chip load

Para el cálculo de la siguiente gráfica se han utilizados los siguientes valores:

- Frecuencia: 916 MHz
- $\lambda = \frac{c}{f} = 0.33$  metros
- $P_{\text{reader}} = 20$  (dBm)
- $G_{\text{reader}} = 5$  (dB)
- Sensibilidad -86 (dBm)
- $G_{\text{tag}} = 0.82$  (dB)



**Figura 3. 3. Cálculo analítico de la pérdida de propagación en función de la distancia y del coeficiente de reflexión**

Se puede observar que esta primera aproximación ofrece un resultado muy básico del nivel de señal en función de la distancia y del coeficiente de reflexión.

Al aumentar la distancia se aprecia que el nivel de señal disminuye de forma exponencial.

Hay que decir que este primer resultado no es válido para caracterizar un recinto ya que no tiene en cuenta la geometría del mismo, pero es una forma rápida de ver cual es el alcance (aproximado) de nuestro sistema.

### 3.1.1.2. Segunda aproximación

La búsqueda de la máxima precisión es nuestro objetivo, por lo tanto se ha visto conveniente el uso de un modelo analítico de radiopropagación que tenga en cuenta tanto la altura del receptor como la del lector.

Esta aproximación nos acercará un poco más a un caso real, donde el lector estaría situado a la altura del carro de la compra y el receptor a la altura de las diferentes estanterías.

Teniendo en cuenta que las etiquetas estarán adheridas en los diferentes productos existentes en las estanterías y que estos son de materiales diferentes, se cree oportuno realizar los cálculos para diferentes materiales. Hemos considerado cuatro posibilidades:

1. Que la etiqueta RFID no este adherida a ningún material (Free Space).
2. Que la etiqueta RFID este adherida en madera de unos 20mm.
3. Que la etiqueta RFID este adherida a una botella de vidrio con agua dentro.
4. Que la etiqueta RFID este adherida en metal de unos 15mm.

El modelo que hemos implementado y con el cual hemos obtenido los resultados se comenta y se explica detalladamente a continuación.

$$P_{r,reader} \text{ (dBm)}$$

$$= P_{reader} \text{ (dBm)} + 2G_{reader} \text{ (dB)} - 2L_{sys} \text{ (dB)}$$

$$+ 20\log|\rho'|^2 + 2G_{tag} \text{ (dB)} + 2\Delta G \text{ (dB)} - 2L_p$$

$$\Delta G = G_{tag \text{ material}} \text{ (dB)} - G_{tag \text{ espacio libre}} \text{ (dB)}$$

Dónde:

- $P_{reader}$  es la potencia transmitida por el lector.
- $G_{reader}$  y  $G_{tag}$  son las ganancias del lector y de la etiqueta RFID respectivamente.
- $L_{sys}$  son las pérdidas del cable.
- $\rho$  es el coeficiente de reflexión de la etiqueta RFID y viene dado por la expresión:

$$\rho = \frac{Z_{antena} - Z_{load}}{Z_{antena} + Z_{load}}$$

Dónde  $Z_{antena}$  es la impedancia de entrada de la antena y  $Z_{load}$  es la impedancia del circuito integrado.

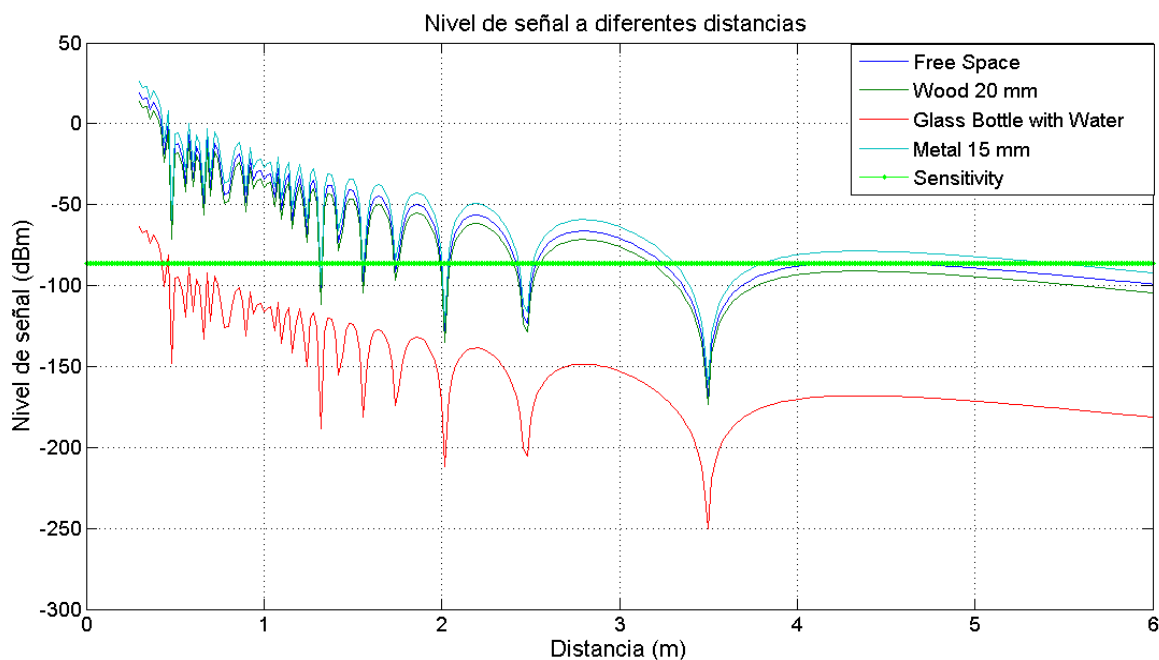
Como se ha dicho anteriormente se va a tener en cuenta a la hora de calcular las pérdidas, las alturas del receptor y del lector, estas pérdidas vienen dadas por la siguiente expresión:

$$L_p = -10\log \left[ \left( \frac{h_1 h_2}{r^2} \right)^2 \left( \frac{\sin \frac{2\pi}{\lambda} \frac{h_1 h_2}{r^2}}{\frac{2\pi}{\lambda} \frac{h_1 h_2}{r^2}} \right) \right]$$

- Donde  $h_1$  y  $h_2$  son la altura del lector y de la etiqueta respectivamente.
- $\lambda$  es la longitud de onda
- $r$  es la distancia.

Para la realización de la siguientes gráficas se han tomado los siguientes valores:

- Frecuencia: 916 MHz
- $\lambda = \frac{c}{f} = 0.33$  metros
- $P_{reader} = 20$  (dBm)
- $G_{reader} = 5$  (dB)
- Sensibilidad -86 (dBm)
- $G_{tag} = 2.14$  (Espacio libre) (dB)
- $G_{tag} = 0.82$  (Madera 20mm) (dB)
- $G_{tag} = 2.14$  (Botella vidrio con agua) (dB)
- $G_{tag} = 2.14$  (Metal 15mm) (dB)
- $\rho = 0.5$
- $h_1 = 1.035$  (Altura del lector) (m)
- $h_2 = 2$  (Altura de la etiqueta) (m)

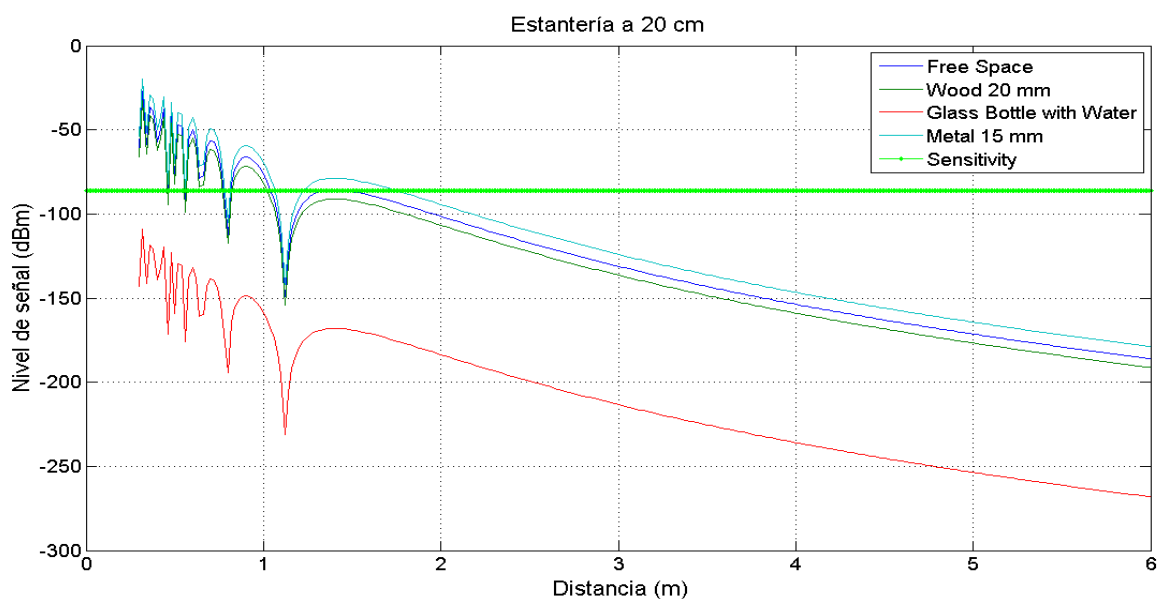


**Figura 3. 4. Cálculo analítico de las pérdidas de propagación para etiquetas de materiales diferentes y para una determinada altura.**

Se puede observar que el nivel de señal no sigue la forma de una exponencial invertida como en el caso anterior, sino que la gráfica es mucho más compleja ya que ahora no depende únicamente de la distancia.

Para demostrar la dependencia del nivel de señal con respecto a la altura del receptor y del lector, sean realizado diferentes cálculos.

Para intentar acercarnos lo máximo posible a la realidad, la altura del lector se quedará fijo a una altura de 1.035 metros que es la altura de un carro estándar, y la altura de la etiqueta la colocaremos a 20, 70, 120, 170 cm intentando simular las estanterías de un supermercado.



**Figura 3. 5. Nivel de señal en una estantería a 20 cm del suelo**



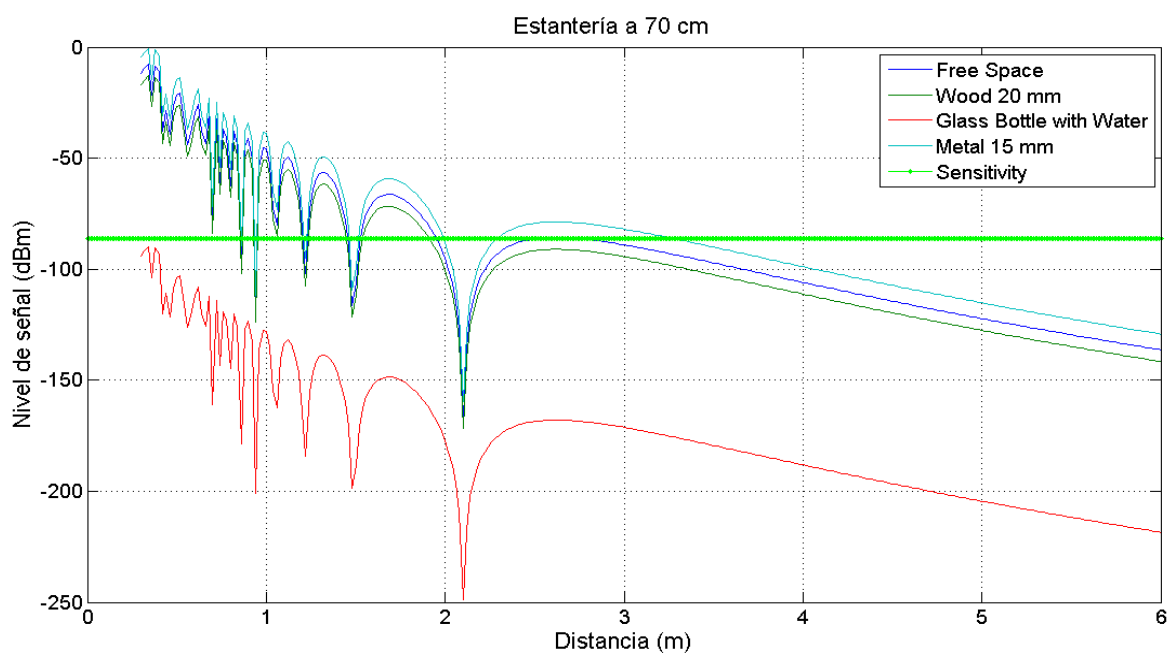


Figura 3. 6. Nivel de señal en una estantería a 70 cm del suelo

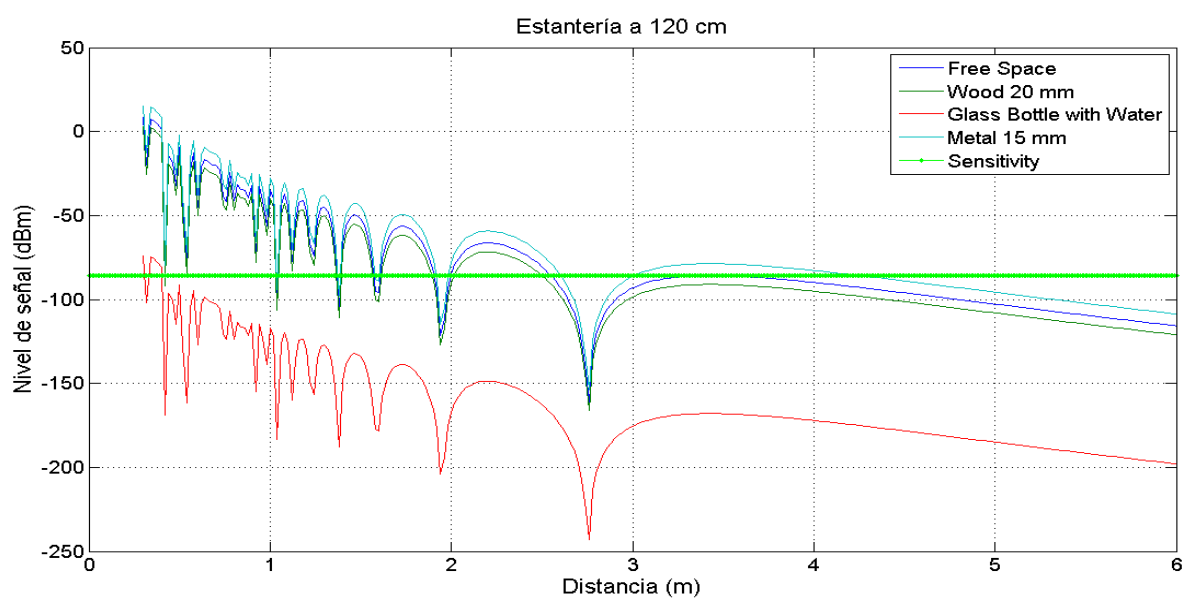


Figura 3. 7. Nivel de señal en una estantería a 120 cm del suelo

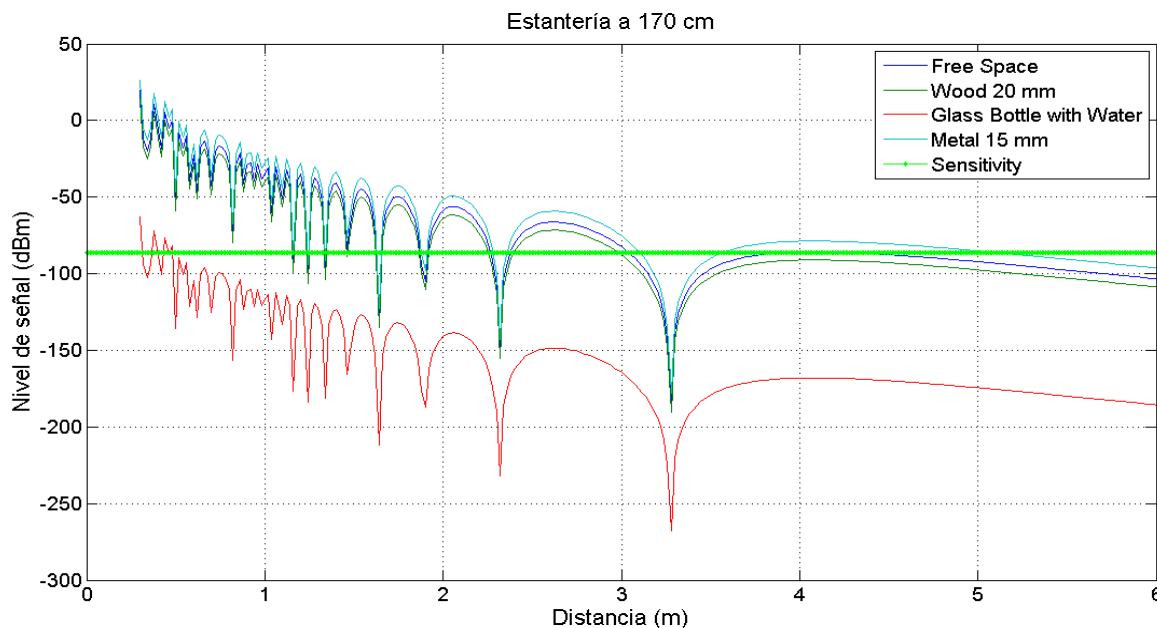


Figura 3. 8. Nivel de señal en una estantería a 170 cm del suelo

Se observa que a mayor altura de la estantería el nivel de señal es mejor. Para el caso más extremo de la estantería a 20 cm del suelo, a partir de un metro de distancia sería inviable establecer un enlace de radio frecuencia, sin embargo al aumentar la altura de las estanterías la distancia de “cobertura” también aumenta, lo que nos permite establecer enlaces de mayor distancia.

### 3.1.2. ZigBee

Implementar un modelo analítico para ZigBee es mucho más sencillo que para el caso de RFID ya que hay que tener en cuenta menos variables como por ejemplo la ganancia de la etiqueta.

El modelo implementado ha sido el siguiente:

$$P_{r,ecibida} \text{ (dBm)} = P_{transmitida} \text{ (dBm)} + G_{transmisor} \text{ (dB)} - L_p \text{ (dB)} + G_{receptor} \text{ (dB)}$$

$$L_p = -20 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right) + n_1 * 10 \log(r)$$

Donde  $n_1$  es un factor de pérdidas de propagación para distancias cortas.

Para la realización de las siguientes gráficas se han tomado los siguientes valores:

- Frecuencia: 2.4GHz
- $\lambda = \frac{c}{f} = 0.125 \text{ metros}$
- $P_{transmisor} = 10 \text{ (dBm)}$
- $G_{transmisor} = 5 \text{ (dB)}$
- $G_{receptor} = 5 \text{ (dB)}$
- Sensibilidad -102 (dBm)

Para un factor de pérdidas  $n_1 = 2$ , obtenemos el siguiente resultado.

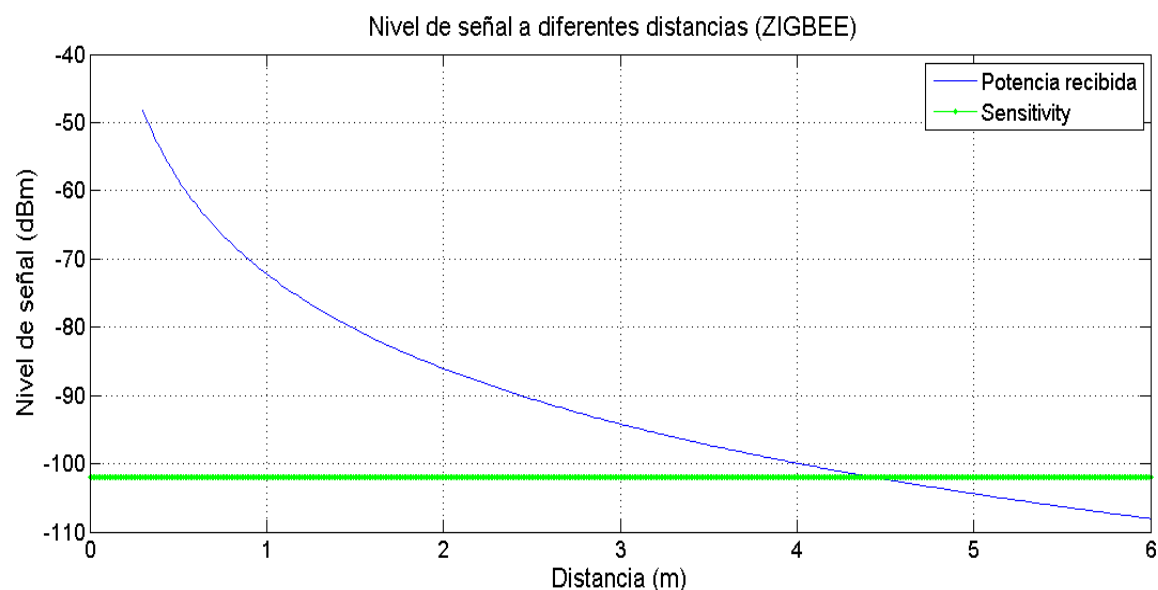


Figura 3. 9. Nivel de señal para el sistema ZigBee para  $n1 = 2$

Para un factor de pérdidas  $n1 = 5$ , obtenemos el siguiente resultado.

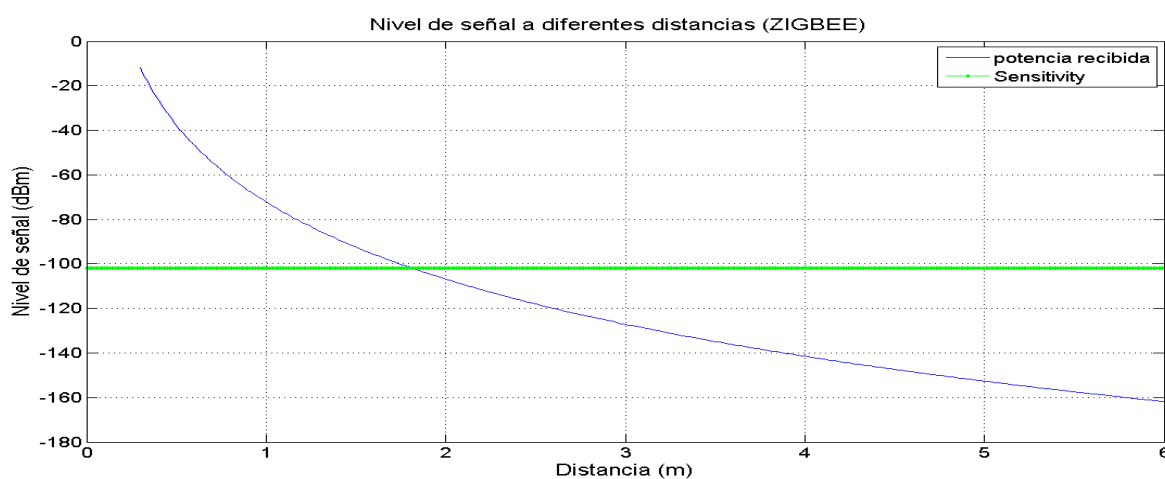


Figura 3. 10. Nivel de señal para el sistema ZigBee para  $n1 = 5$

Para un factor de pérdidas  $n1 = 8$ , obtenemos el siguiente resultado.

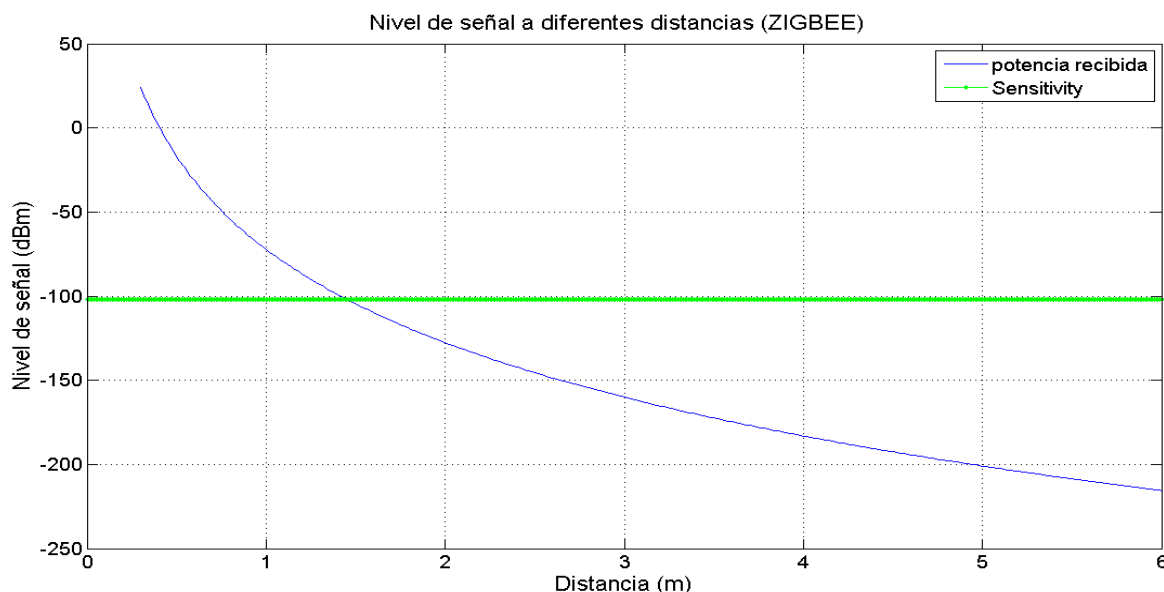


Figura 3. 11. Nivel de señal para el sistema ZigBee para  $n_1 = 8$

Dado que  $n_1$  es un factor de pérdidas de propagación cuanto mayor sea este factor mayores serán las pérdidas y por lo tanto menor será el nivel de señal.

## 3.2. Método determinista: Trazado de Rayos

Están basados en las leyes físicas y en la geometría concreta del entorno. Requieren gran cantidad de datos relativos al escenario tales como localización de objetos y las características físicas de los mismos, por ello, estos métodos requieren de un mayor coste computacional, pero son mucho más exactos.

Algunas de las características del trazado de rayos en tres dimensiones son:

1. Recreación de una propagación multitrayecto realista.
2. Modelado en tres dimensiones de todo tipo de entornos complejos con habitaciones, múltiples plantas, múltiples edificios con diferentes formas y tamaños.
3. Caracterización y modelado de cualquier tipo de objeto mediante su forma tridimensional y su constante dieléctrica.
4. Caracterización de objetos o personas en movimiento.
5. Implementación de los fenómenos de la difracción, refracción, reflexión y scattering.
6. Cálculo de las interacciones entre los rayos y los objetos teniendo en cuenta la polarización de la onda.
7. Modelado de cualquier tipo de antena transmisora o receptora.

8. Duración de la simulación de un rayo determinado mediante número de rebotes, retardo máximo, magnitud de campo eléctrico mínimo, etc.

El procedimiento básico en un método de trazado de rayos es el algoritmo de lanzamiento de rayos.

En primer lugar, un rayo es lanzado desde la antena de transmisión, después, el rayo es trazado para ver si choca con algún objeto o con la antena receptora. Cuando el rayo es interceptado por un objeto, sucede alguno de los fenómenos de propagación como la reflexión, la transmisión, la difracción o el scattering dependiendo de la geometría y las propiedades eléctricas del objeto.

### 3.2.1. Descripción del escenario

A continuación se va a describir el escenario a simular, hay que decir que se ha intentado que sea lo mas fiel posible a un recinto comercial real.

El escenario consta de dos estanterías con 6 baldas cada una, separadas por un pasillo donde esta situado un carro de la compra.

Las dimensiones del escenario son:

- 8m (largo) x 5m (ancho) x 3m (alto)

Las dimensiones de las estanterías son:

- 6m(largo) x 0.5m (ancho) x 2m (alto)
- La distancia entre baldas son 30 cm
- La distancia entre estanterías es 3m

Las dimensiones del carro son:

- 1.020m (largo) x 0.610m (ancho) x 1.035m (alto)
- Las especificaciones detalladas del carro se encuentran en el Anexo 4

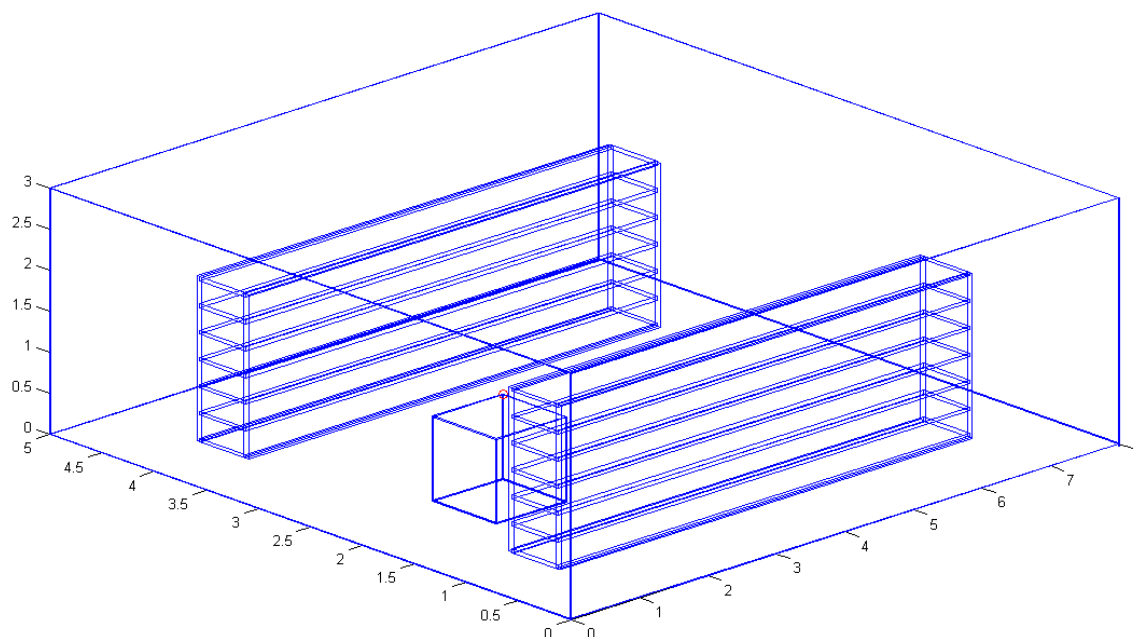


Figura 3. 12. Escenario en 3D



Figura 3. 13. Escenario (planta)

Lo primero, antes de ponerse a simular fue pensar cual sería la posición más idónea para la colocación de la antena en el carro. Se simularon 4 posiciones de antena diferentes tanto para RFID como para ZigBee, en la memoria se van a analizar solamente dos posiciones diferentes de antena, el resto de las simulaciones se encuentran en el Anexo 1

A continuación se explica los detalles de la simulación y algunos resultados

### 3.2.2. Trazado de rayos

Antes de realizar la simulación se determinó unos parámetros de entrada:

- La posición de la antena.
- La potencia a la que emite la antena.
- La frecuencia a la que se desea emitir.
- El tipo de polarización.
- El tipo de directividad de la antena tanto emisora como receptora.
- La cantidad de rayos que emite la antena
- La cantidad de rebotes que se desee.
- Los grados de emisión máximos y mínimos tanto verticales como horizontales así como la variación para recorrer desde el mínimo hasta el máximo.
- La resolución (tamaño de los cubos)

Se lanzan los rayos desde la antena emisora. Estos rayos se propagan a través del espacio interactuando con los obstáculos que encuentran en su camino, provocando fenómenos físicos tales como la reflexión y la refracción, y se van almacenando los parámetros de estos rayos cuando entran en cada uno de los hexaedros de resolución hasta que el rayo ha dado un número determinado de rebotes o ha superado el tiempo de propagación previamente fijado.

El algoritmo funciona de una manera iterativa, considerando un rayo y sus reflexiones hasta que alcanza el número de rebotes o el retardo establecidos, almacenando los rayos creados por el fenómeno de la difracción para procesarlos más tarde. El escenario que ha sido simulado se divide en cubos, cuyo tamaño definiremos al comienzo del algoritmo, según la resolución que se desee. Cada uno de los denominados cubos funciona como una antena receptora guardando los siguientes parámetros:

- Campo eléctrico
- Potencia recibida
- Retardo potencia

Para conseguir el resultado del campo eléctrico en cada uno de los cubos, se realiza la suma de todos los campos incidentes que han proporcionado cada uno de los rayos al atravesar el cubo. Con la obtención del campo eléctrico en cada uno de los puntos de recepción se obtiene el nivel de potencia recibida en lineal. Esa potencia resultante se convierte a escala decibélica para una mejor visión de los resultados.

Si la antena emisora transmite a 0 dBm los niveles de potencia recibida en cada antena receptora serán los niveles de pérdida de la señal, niveles de atenuación. Si la antena receptora no recibe señal da como valor de potencia -200 dBm. Los diagramas de potencia recibida nos representan para cada una de las secciones que ha sido dividida la altura del escenario, no da un mapa de cobertura. Se puede apreciar los elementos que producen atenuaciones en el espacio, así como claramente donde se encuentra la antena. Con esta información se puede obtener los radiales potencia, que representan para cada una de las secciones de altura y anchura, la potencia a lo largo del escenario.

Para la realización de la simulación se han mantenido una serie de datos constantes.

- Potencia de transmisión = 1mW  $\rightarrow$  0dBm
- Polarización vertical para las antenas de transmisión y recepción.
- Antena en transmisión y recepción  $\rightarrow$  Omnidireccional.
- $\Phi$  variando de 0 a  $2\pi$ , con un incremento de  $\pi/180$ .
- $\theta$  de 0 a  $\pi$ , con un incremento de  $\pi/180$
- Numero de rebotes= 5
- Frecuencia RFID= 860 Mhz
- Frecuencia ZigBee= 2.4Ghz
- La posición de la antena se ha ido variando



Los niveles de retardo potencia, nos indican cómo afectan los rayos a la antena receptora según el tiempo. Según si son rayos directos o los diferentes rayos que provienen de una reflexión con los diferentes obstáculos como pueden ser las paredes del habitáculo.

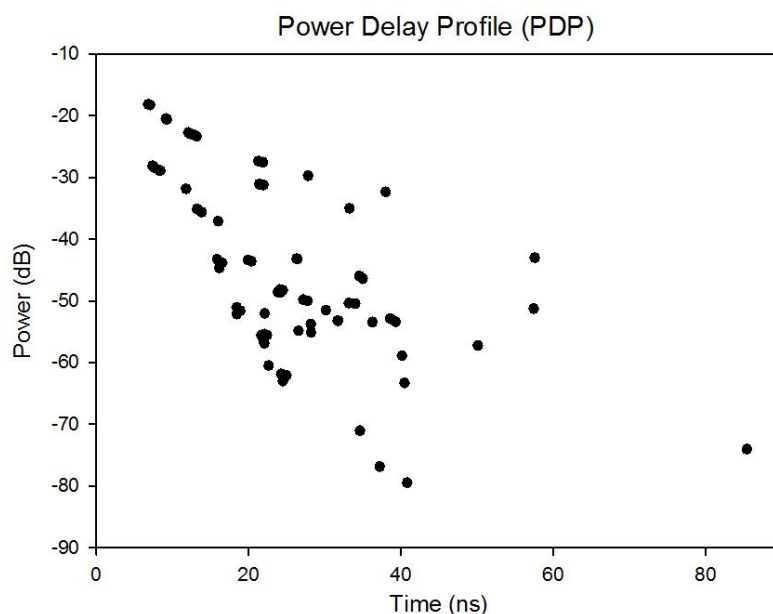


Figura 3. 14. Perfil de retardo potencia

### 3.2.3. Cálculo de la posición de la antena

Para determinar la mejor posición de la antena en el carro, se propusieron 4 posibles colocaciones, que se analizaron en tres escenarios diferentes, obteniendo así un resultado preciso.

En esta memoria, solamente se van a analizar dos posiciones de antena, las restantes simulaciones obtenidas con las diferentes posiciones de antena y en los distintos escenarios se encuentran en el Anexo 1

#### 3.2.2.1. Posición antena centro

En este caso la posición de la antena es: 4.51m (x), 2.5m (y), 0.5175m (z) que corresponde con el centro del carro.

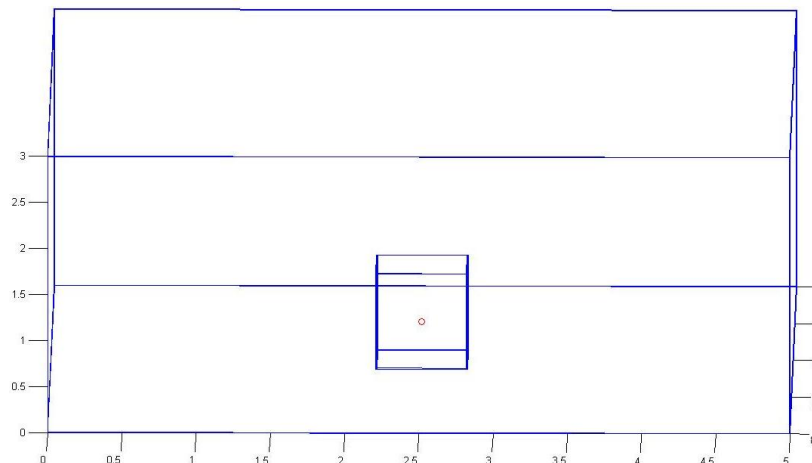


Figura 3. 15. Posición antena en el centro del carro

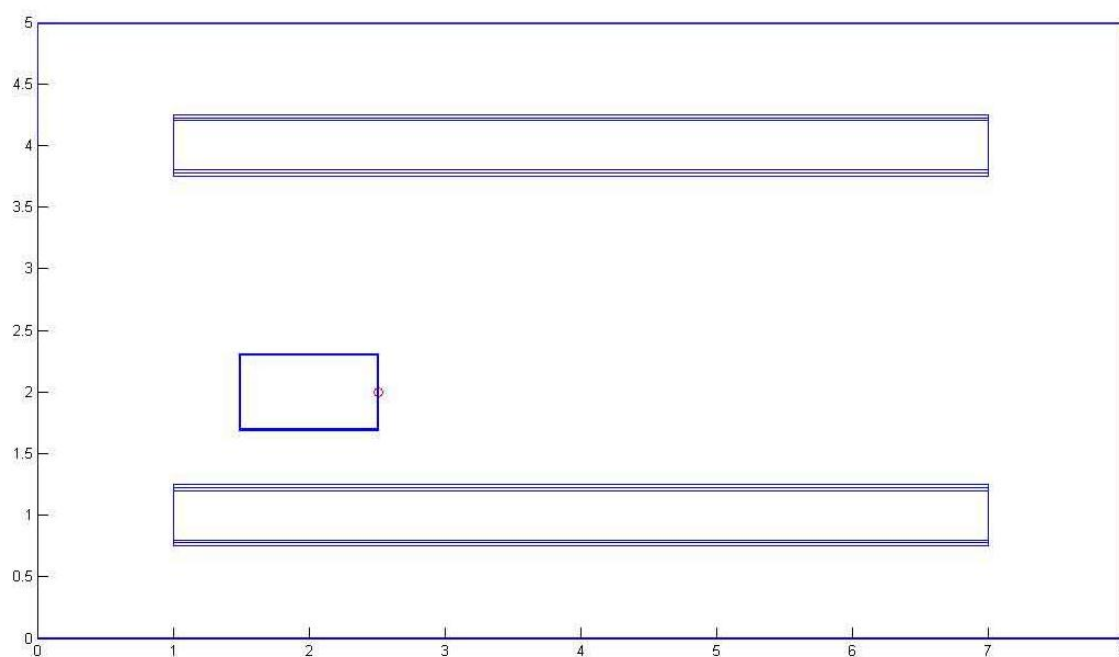


Figura 3. 16.Planta del escenario con la antena en el centro del carro

### 3.2.2.1.1. RFID

A continuación se van a mostrar los resultados obtenidos para RFID a distintas alturas, para una colocación de la antena en el centro del carro.

0.5 METROS

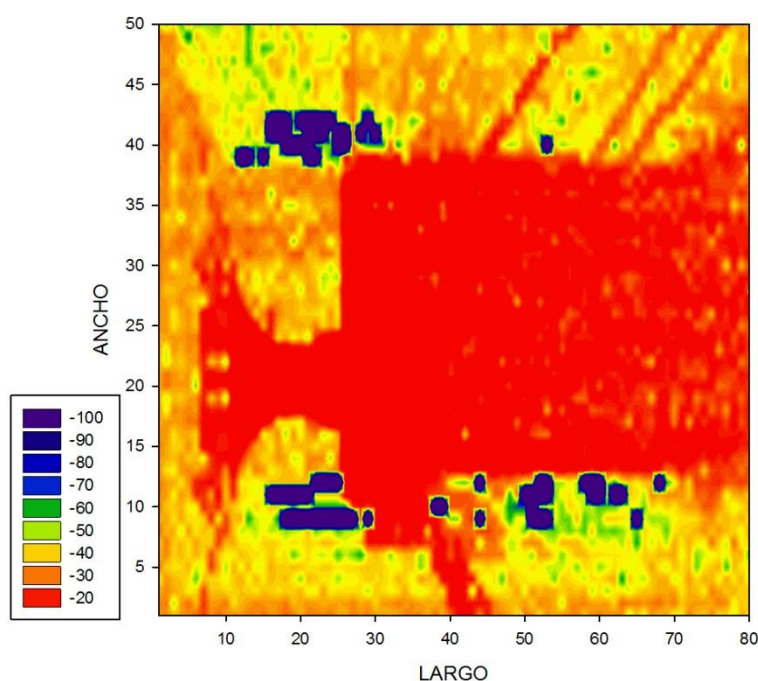


Figura 3. 17. Nivel de señal a 0.5 metros de altura

1 METROS

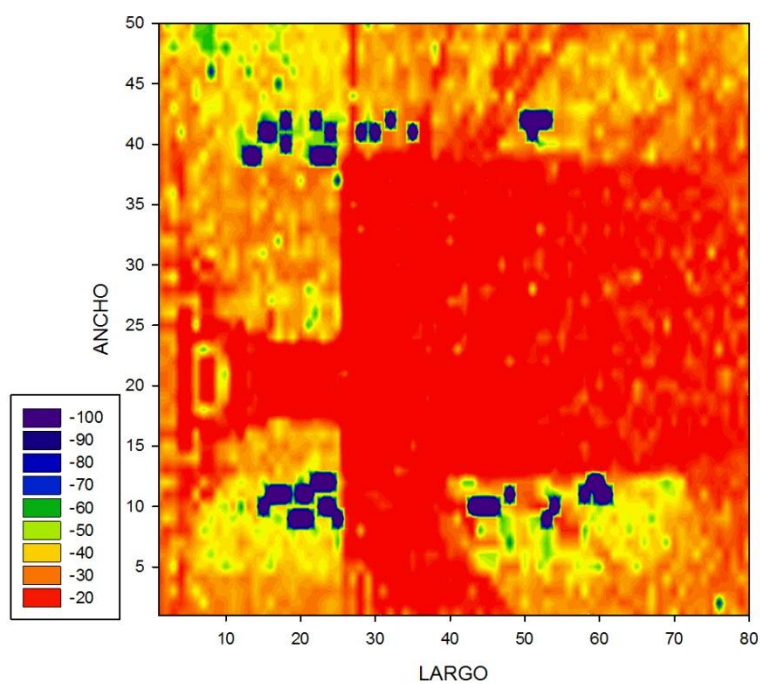


Figura 3. 18. Nivel de señal a 1 metro de altura  
1.5 METROS

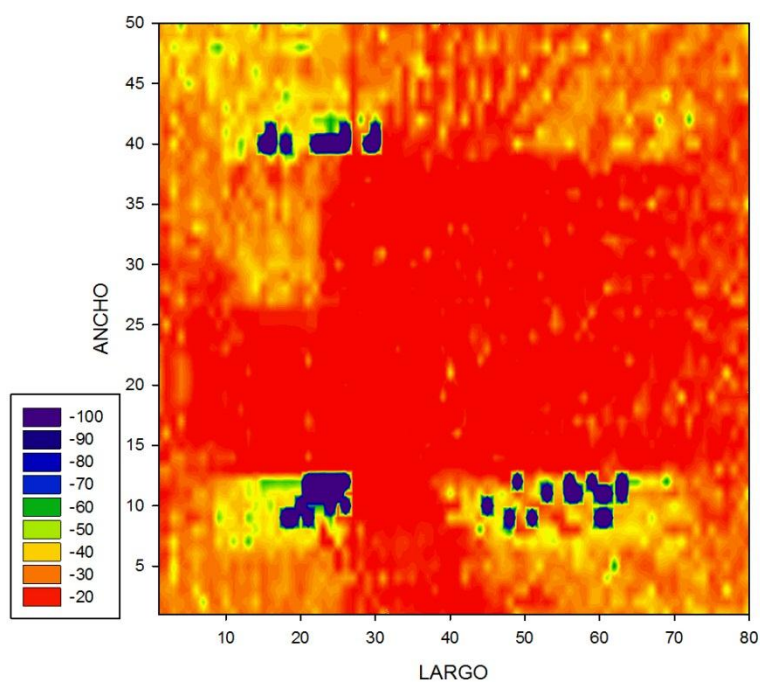


Figura 3. 19. Nivel de señal a 1.5 metros de altura

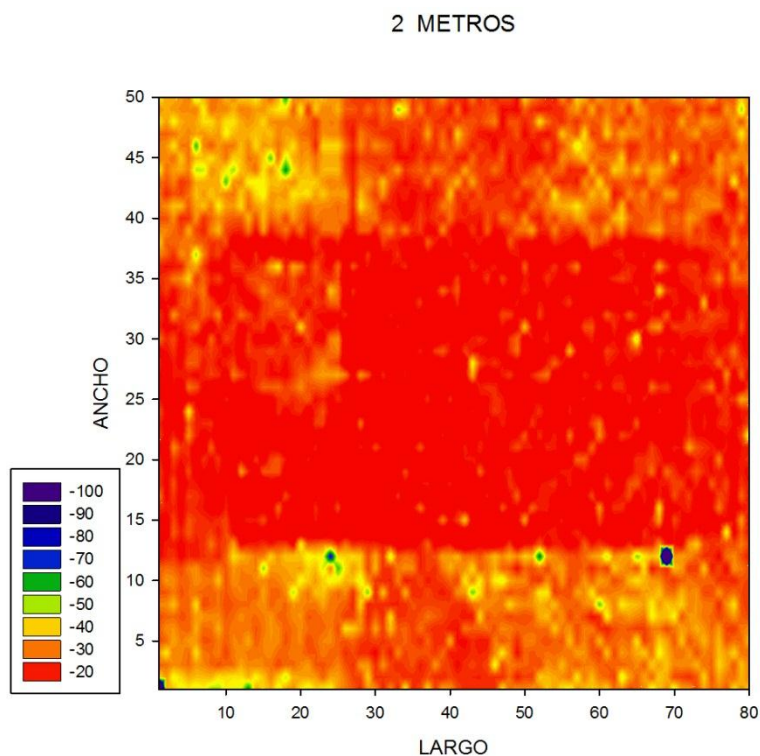


Figura 3. 20.Nivel de señal a 2 metros de altura

### 3.2.2.1.2. ZigBee

A continuación se van a mostrar los resultados obtenidos para ZigBee a distintas alturas, para una colocación de la antena en el centro del carro.

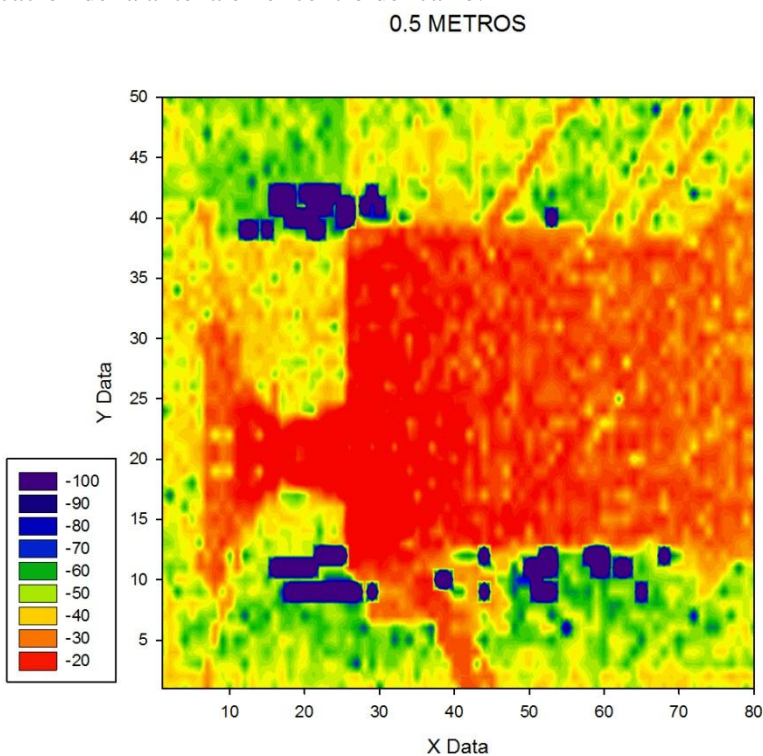


Figura 3. 21.Nivel de señal a 0.5 metros de altura



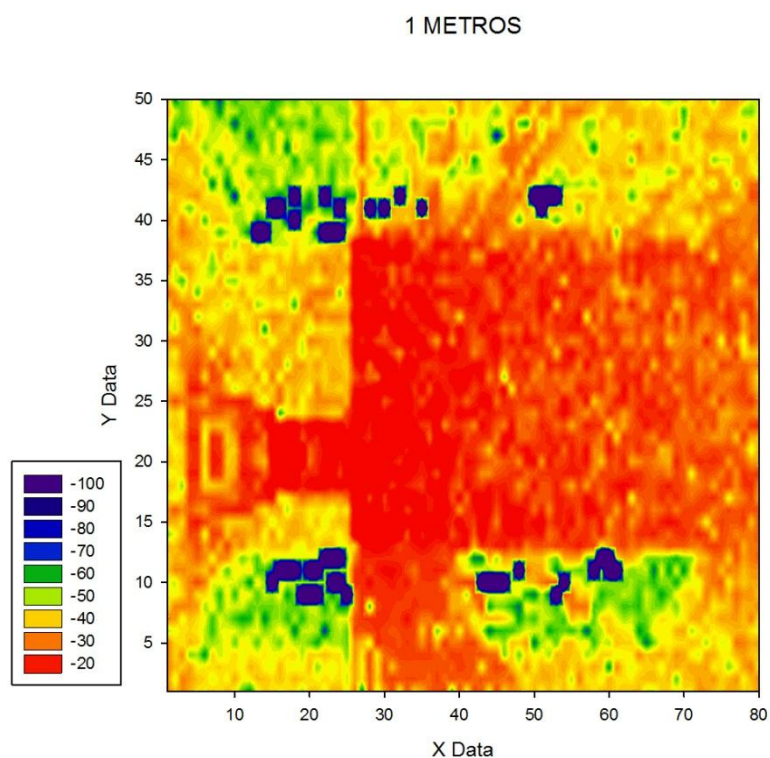


Figura 3. 22. Nivel de señal a 1 metro de altura

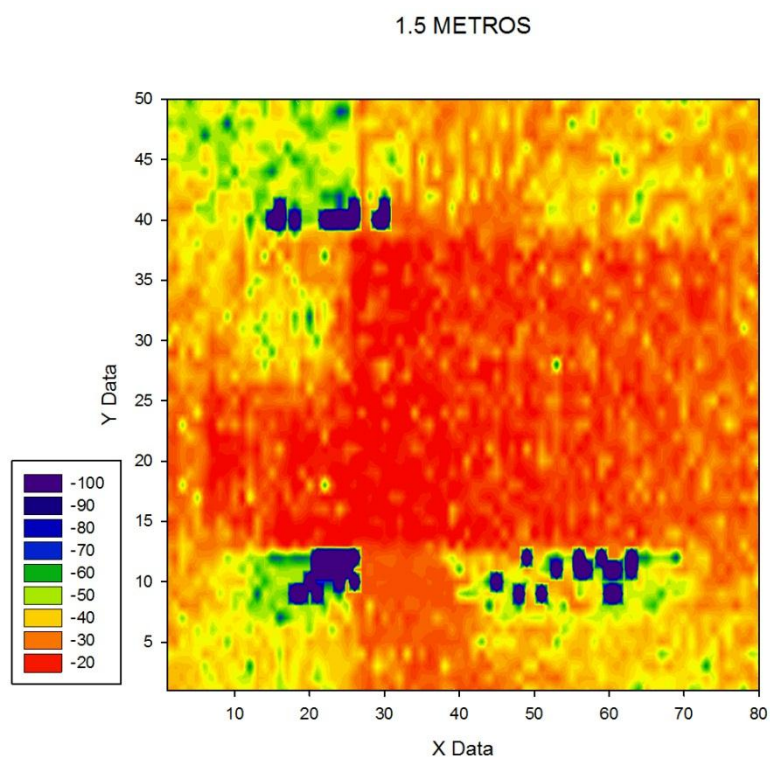


Figura 3. 23. Nivel de señal a 1.5 metros de altura

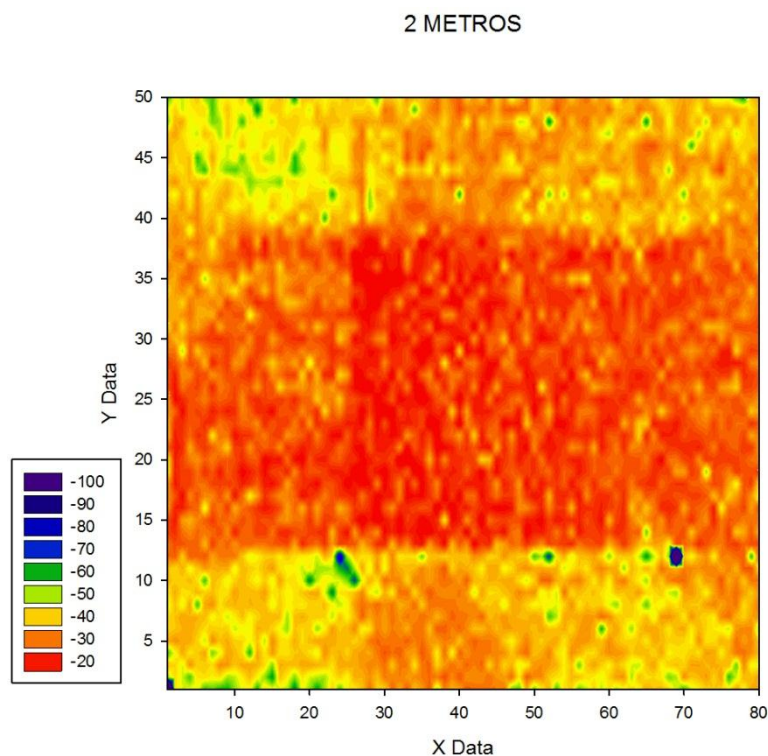


Figura 3. 24. Nivel de señal a 2 metros de altura

### 3.2.2.2. Posición antena esquina

Para este otro caso la posición de la antena es: 2,51m (x), 2,305m (y), 1,035m (z) que corresponde con la esquina superior del carro

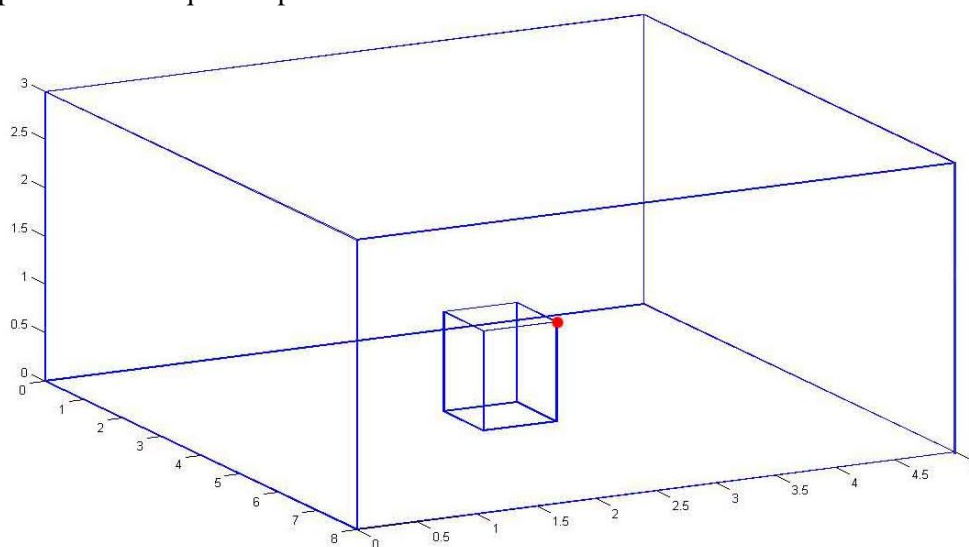


Figura 3. 25. Posición antena en la esquina del carro

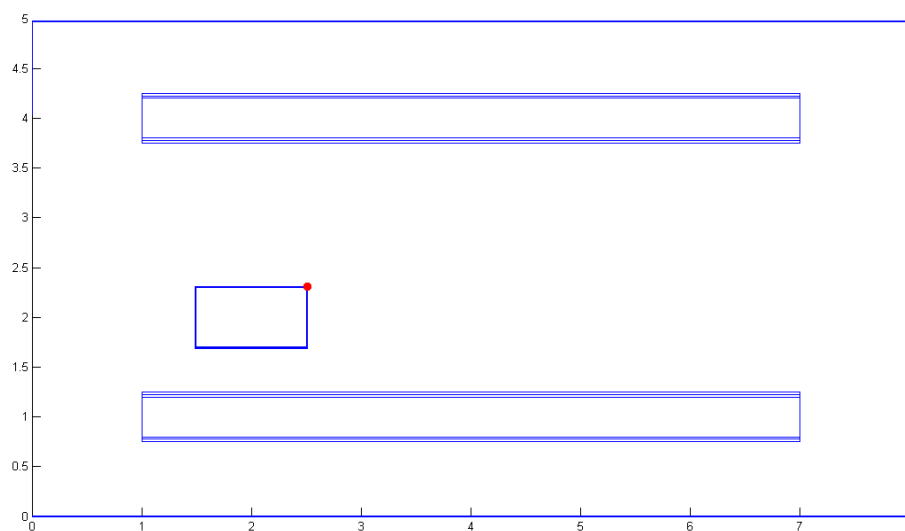


Figura 3. 26. Planta del escenario con la antena en la esquina del carro

### 3.2.2.2.1. RFID

A continuación se van a mostrar los resultados obtenidos para RFID a distintas alturas, para una colocación de la antena en la esquina del carro.

0.5 METROS

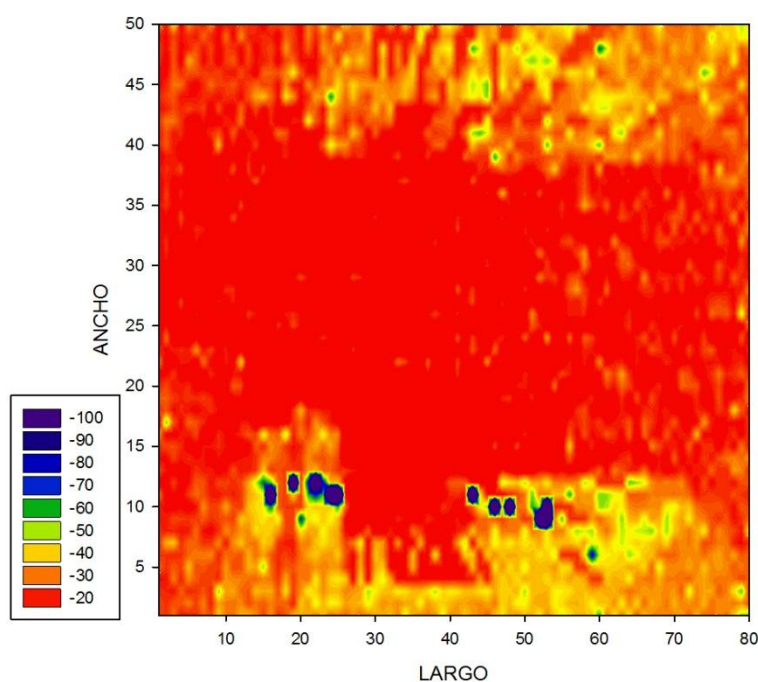


Figura 3. 27. Nivel de señal a 0.5 metros de altura



1 METROS

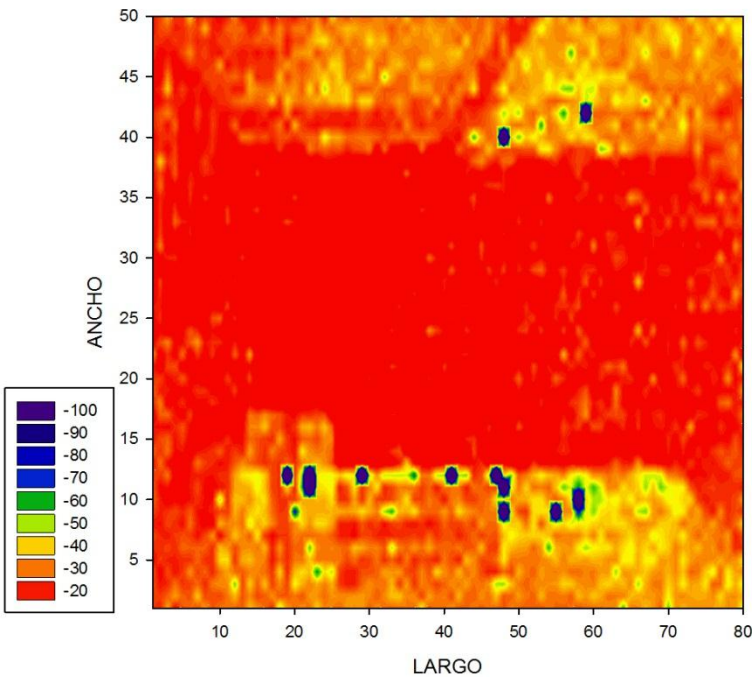


Figura 3. 28. Nivel de señal a 1 metro de altura

1.5 METROS

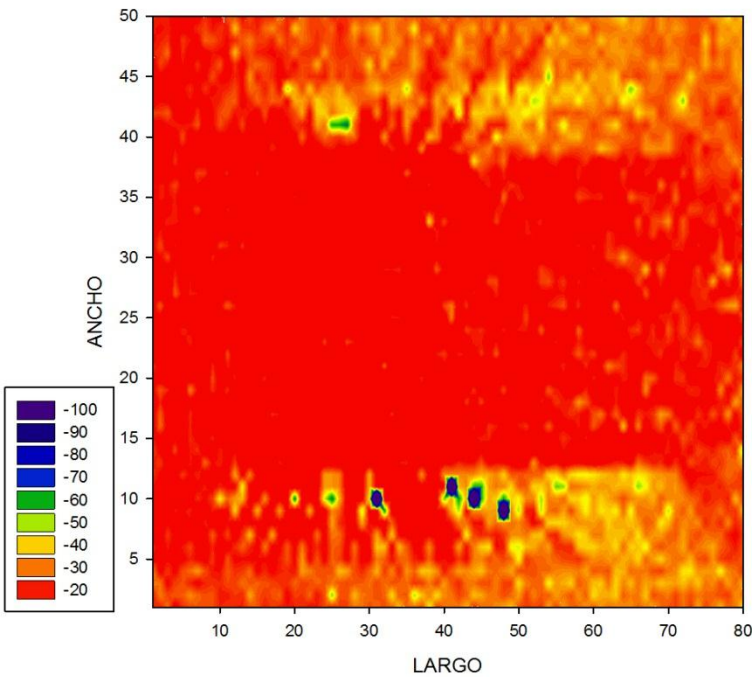


Figura 3. 29. Nivel de señal a 1.5 metros de altura

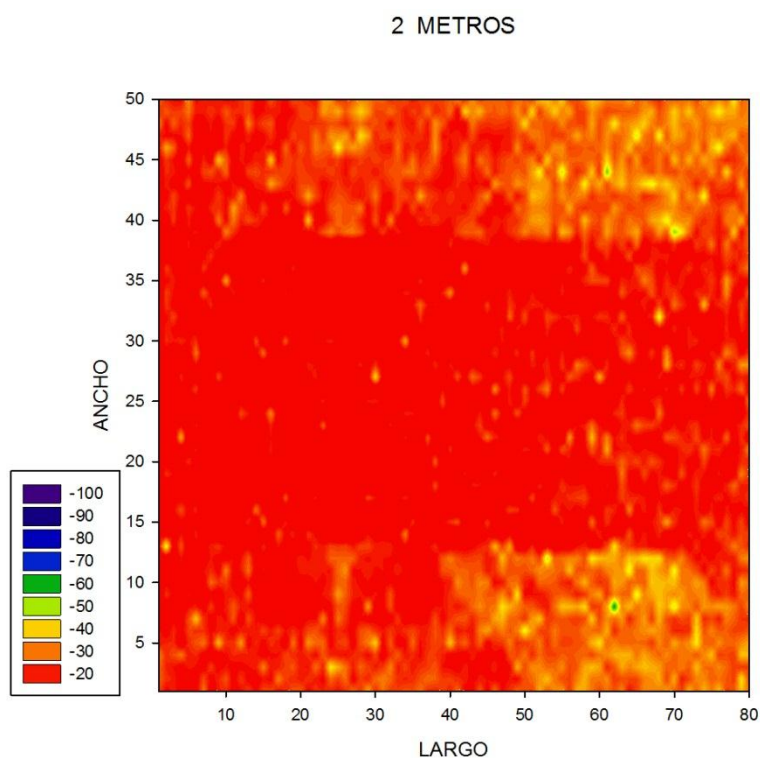


Figura 3. 30. Nivel de señal a 2 metros de altura

### 3.2.2.2.2. ZigBee

A continuación se van a mostrar los resultados obtenidos para ZigBee a distintas alturas, para una colocación de la antena en la esquina del carro.

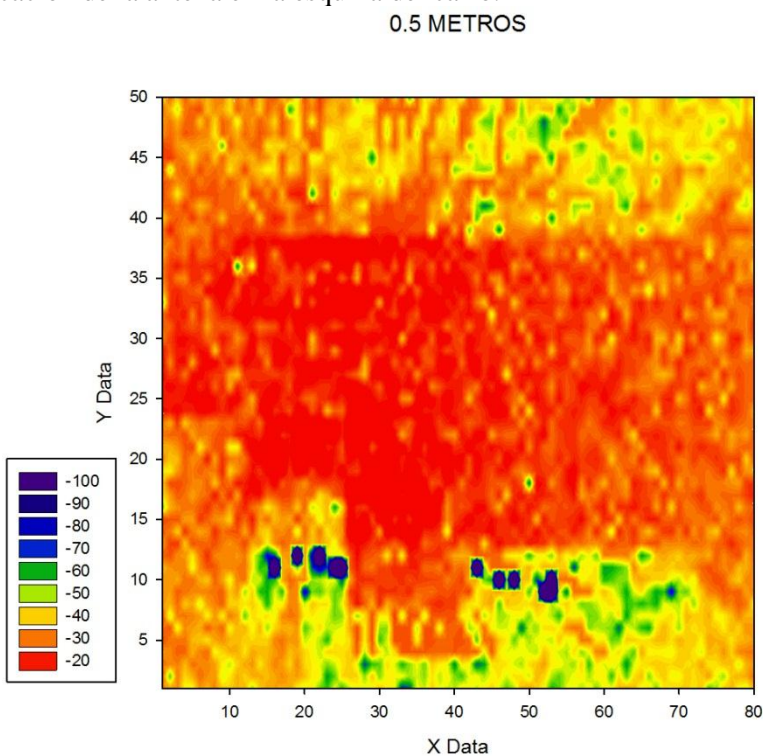


Figura 3. 31. Nivel de señal a 0.5 metros de altura

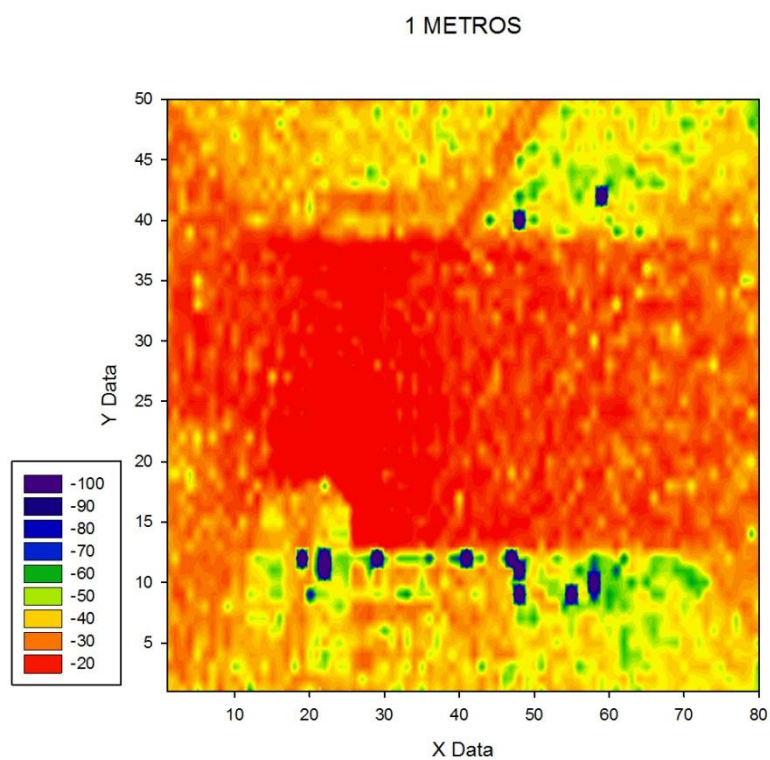


Figura 3. 32. Nivel de señal a 1 metro de altura

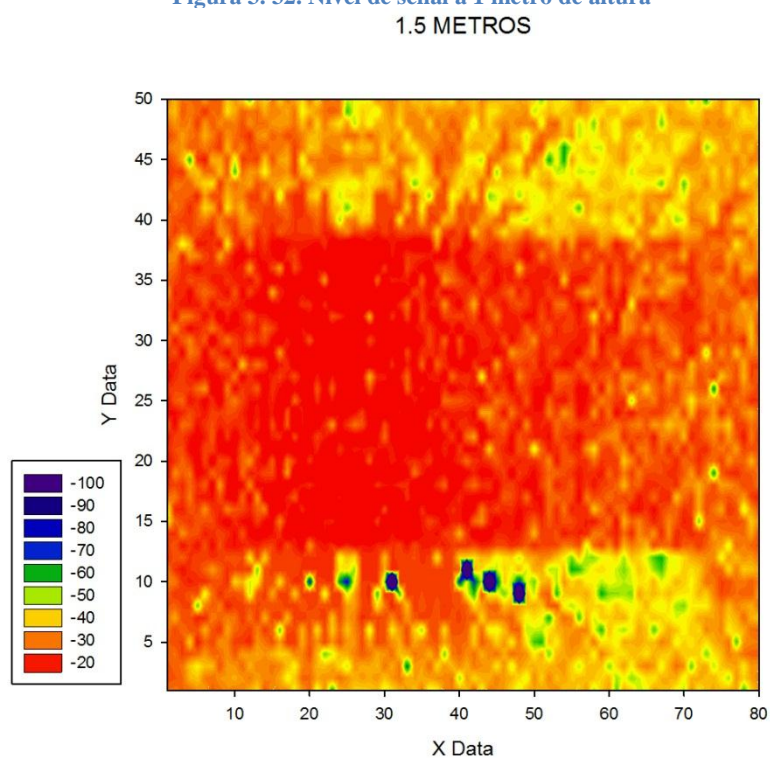


Figura 3. 33. Nivel de señal a 1.5 metros de altura

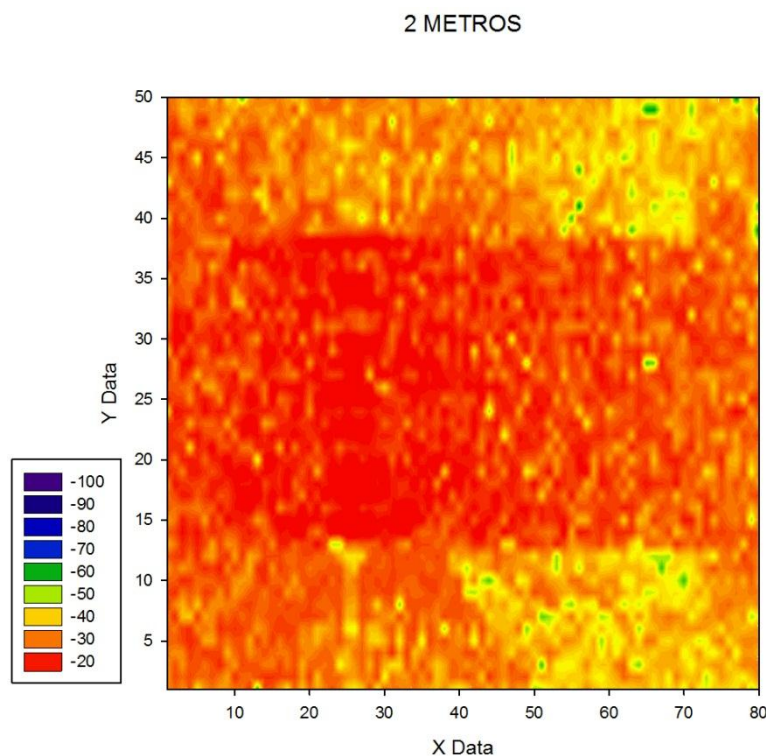


Figura 3. 34. Nivel de señal a 2 metros de altura

### 3.2.3. Mejor posición antena

Una vez visto los resultados obtenidos para la posición de la antena en el centro del carro y en la esquina de este vamos a analizar cual es la posición más adecuada para la colocación de la antena en el carro.

Aunque con las figuras anteriores ya se puede obtener alguna conclusión, como que a mayor altura obtenemos mejor nivel de señal, vamos a analizar una serie de radiales que no ayudaran a obtener una conclusión veraz.

A continuación se ha realizado una imagen para señalar donde se han realizado las radiales.



The figure consists of two line graphs, labeled (a) and (b), showing the signal level (dBm) versus distance (dm) for different materials and antenna positions.

**Graph (a): Nivel de señal en la estantería a 0.5 Metros Posicion antenna carro centro**

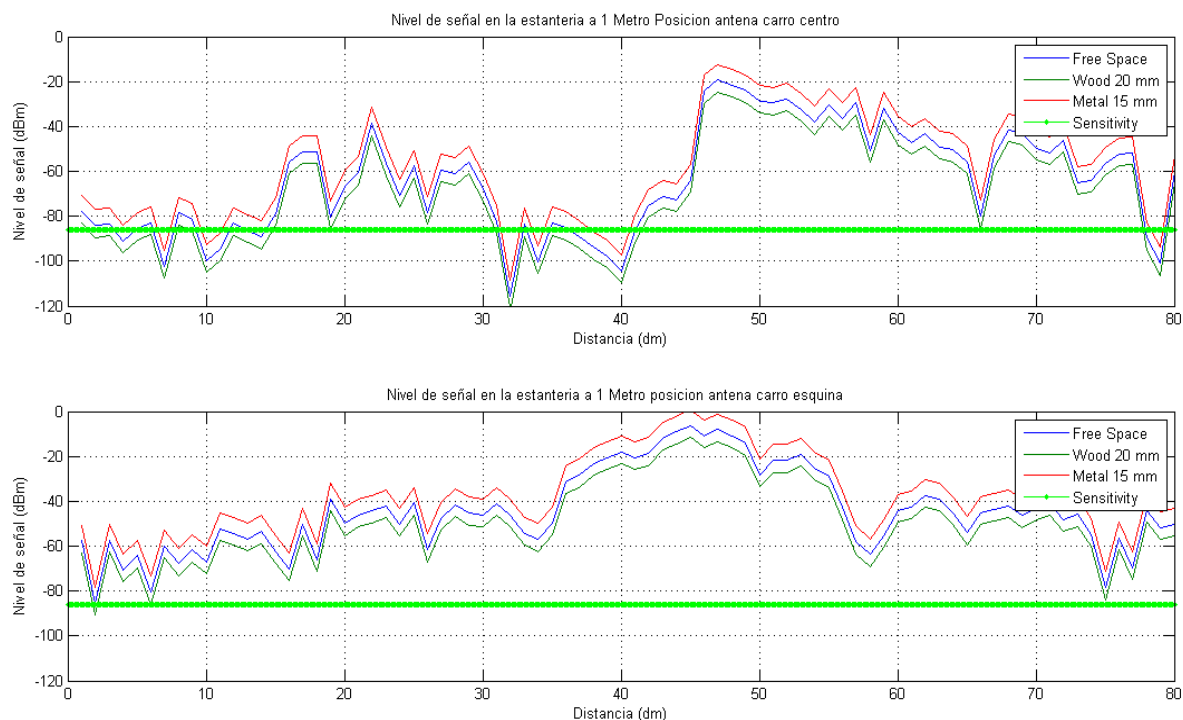
This graph shows the signal level for the center antenna position. The y-axis ranges from -120 to 0 dBm, and the x-axis ranges from 0 to 80 dm. The legend indicates four data series: Free Space (blue line), Wood 20 mm (green line), Metal 15 mm (red line), and Sensitivity (green line with diamond markers). The signal level is generally low, fluctuating between -100 and -80 dBm, with a significant peak around 45 dm reaching approximately -20 dBm.

**Graph (b): Nivel de señal en la estantería a 0.5 Metros posicion antenna carro esquina**

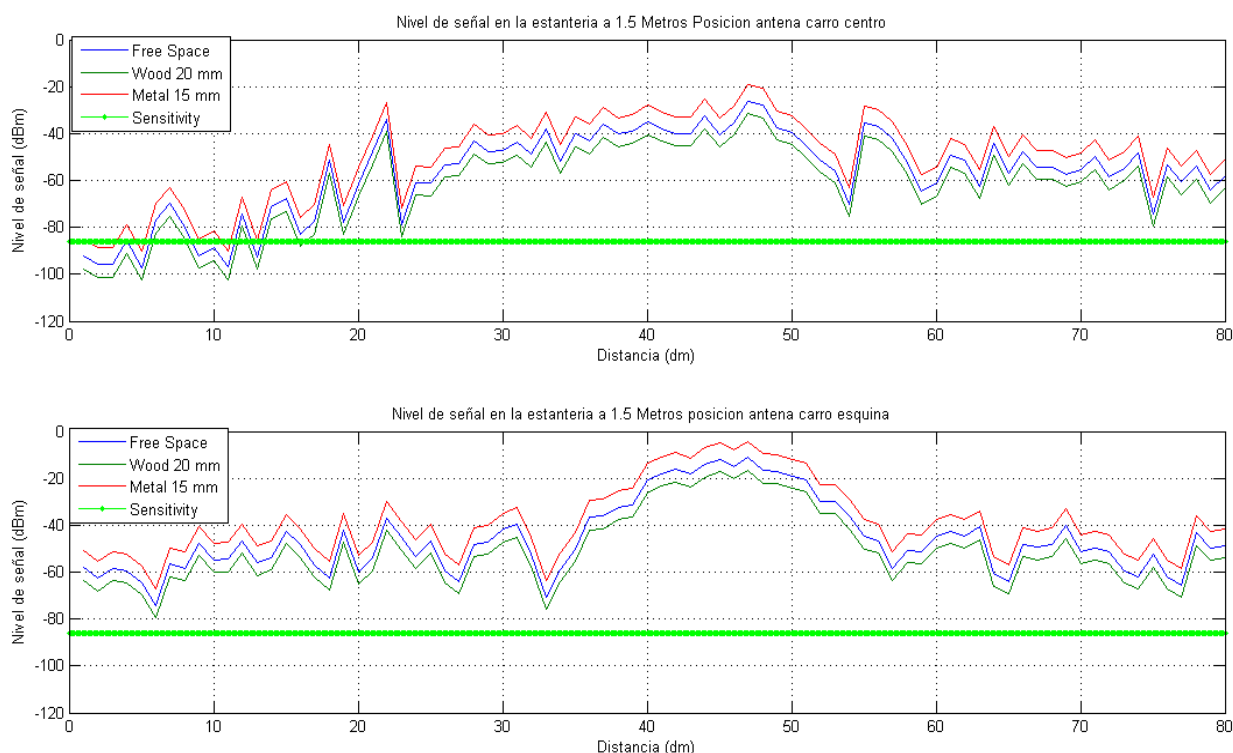
This graph shows the signal level for the corner antenna position. The y-axis ranges from -120 to 0 dBm, and the x-axis ranges from 0 to 80 dm. The legend indicates four data series: Free Space (blue line), Wood 20 mm (green line), Metal 15 mm (red line), and Sensitivity (green line with diamond markers). The signal level is generally low, fluctuating between -100 and -80 dBm, with a significant peak around 45 dm reaching approximately -10 dBm.

**Figura 3. 36. Comparativa a 0.5 metros en la estantería 1 entre la posición de la antena en el centro y en la esquina**

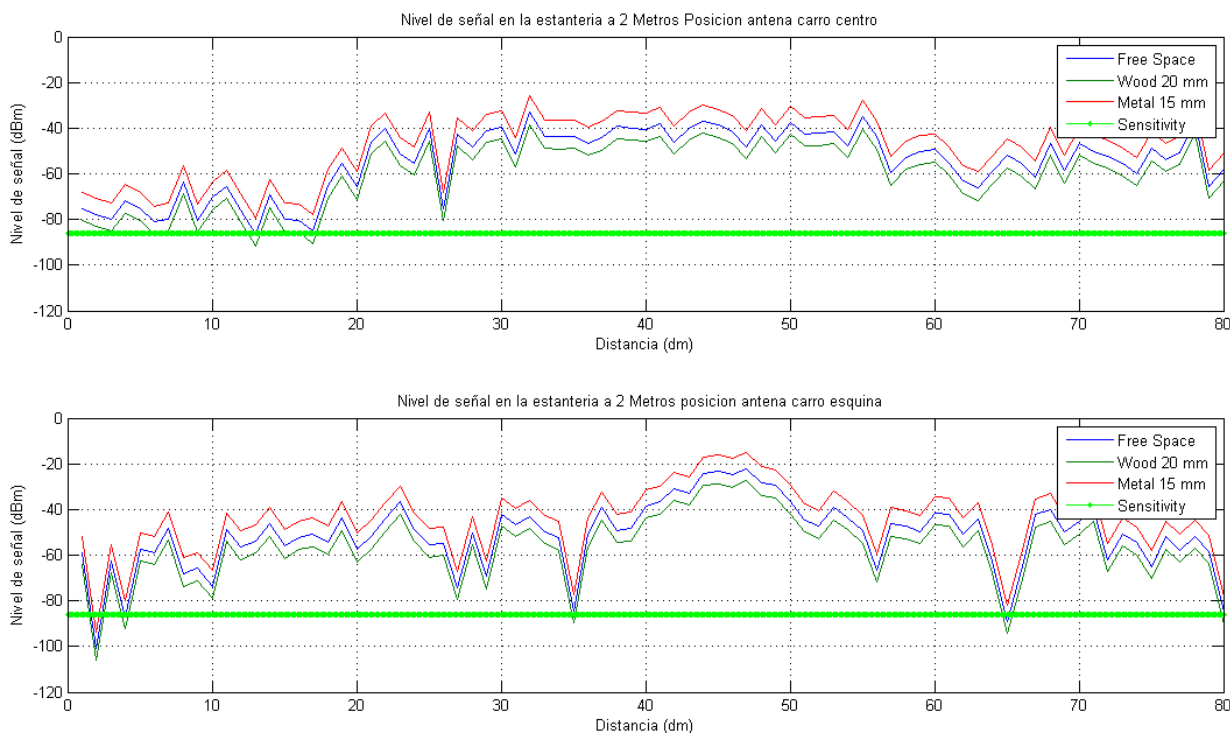




**Figura 3. 37. Comparativa a 1 metro en la estantería 1 entre la posición de la antena en el centro y en la esquina**



**Figura 3. 38. Comparativa a 1.5 metros en la estantería 1 entre la posición de la antena en el centro y en la esquina**



**Figura 3. 39. Comparativa a 2 metros en la estantería 1 entre la posición de la antena en el centro y en la esquina**

Viendo los gráficos anteriores se pueden sacar las siguientes conclusiones.

- El nivel de señal aumenta a medida que aumenta la altura
- La colocación de la antena en la esquina del carro ofrece una respuesta de la señal más uniforme que cuando la antena esta colocada en el centro del carro
- La colocación de la antena en la esquina del carro ofrece una respuesta de la señal menos dependiente de la altura que cuando la antena esta colocada en centro del carro.

La elección final de la posición de la antena se ha contrastado con otras muchas posiciones posibles que están en el Anexo 1 concretamente 4 posiciones diferentes, con 3 posiciones diferentes de carro cada una, lo que da un total de 12 escenarios que se pueden ver en el Anexo 1.

Con el estudio de las gráficas anteriores y de las gráficas del Anexo se ha determinado que la mejor posición de antena para el carro es en una esquina superior.

## 3.4. Escenario Grande

Una vez determinada la mejor posición de antena, se va a estudiar el comportamiento de los sistemas RFID y ZigBee en un escenario más grande.

Este escenario tiene unas dimensiones de 21(m) x 21(m) x 3(m) de largo, ancho y alto respectivamente. Cuenta con 12 estanterías de las mismas dimensiones que las descritas anteriormente. Los pasillos laterales y el central tienen una anchura de 3 metros.

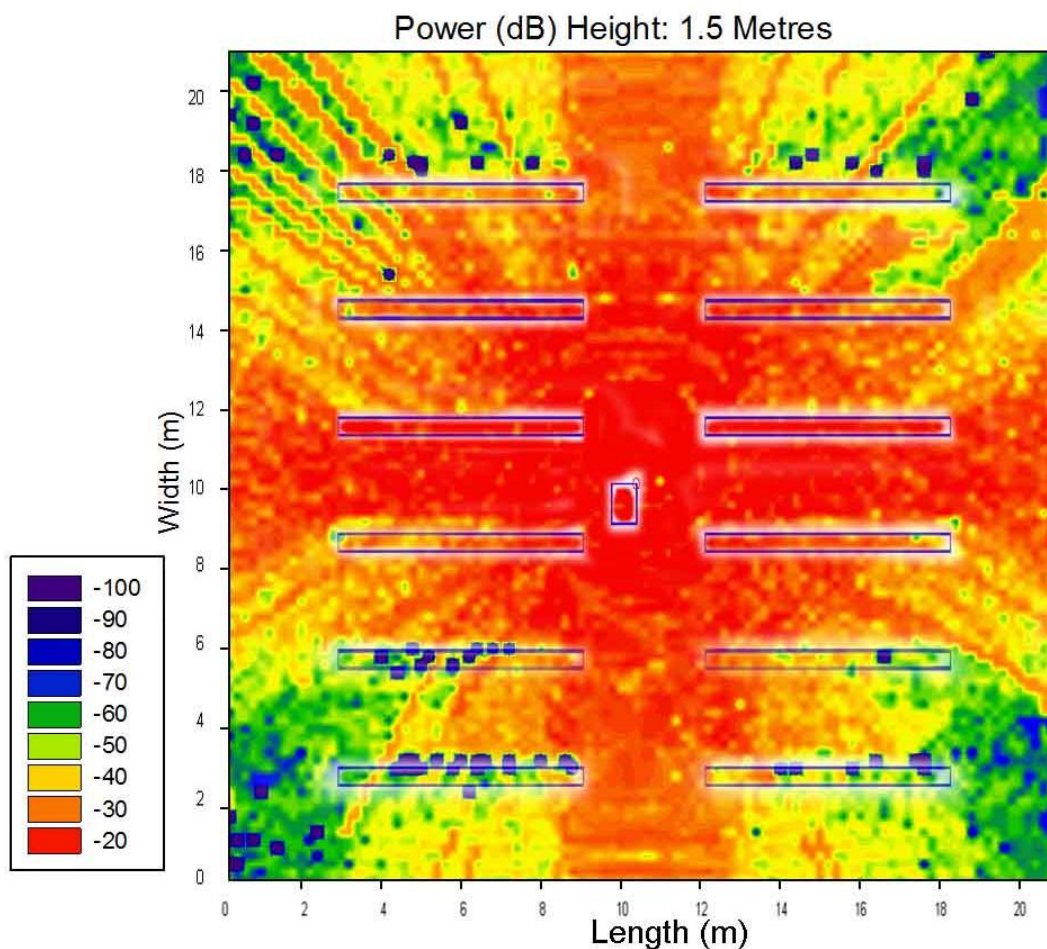


Figura 3. 40. Simulación en un escenario grande a 1.5 metros de altura

Se han realizado 3 simulaciones más con este escenario, cambiando la posición del carro, estas simulaciones y las correspondientes al sistema ZigBee se pueden ver en el Anexo 2.

Para ver detalladamente el nivel de señal en las estanterías para una posible comunicación entre el carro y las estanterías, se ha creado una serie de radiales que se explican a continuación.

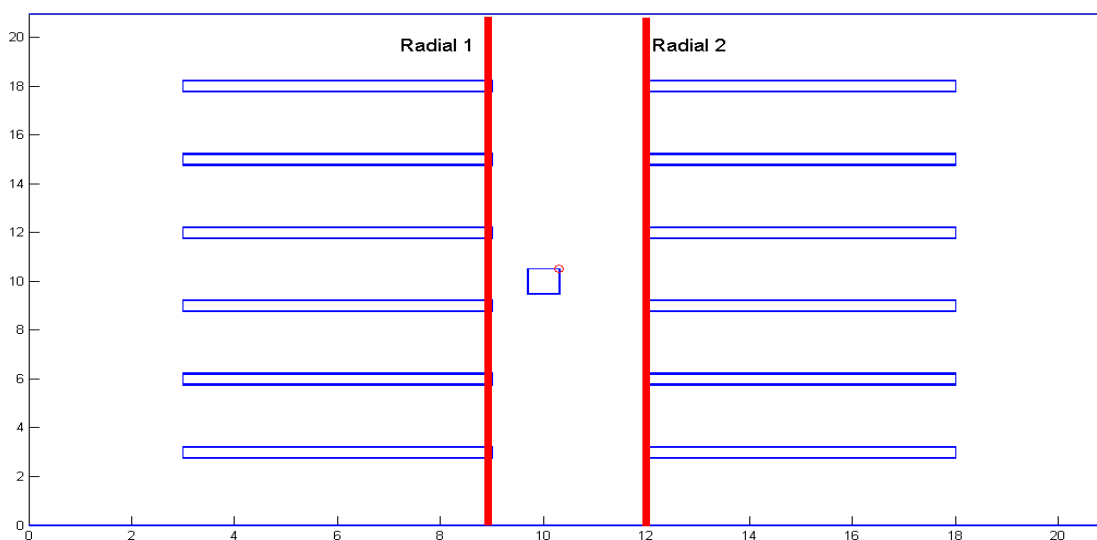


Figura 3. 41. Esquema de las radiales para el estudio de una posible comunicación entre las estanterías y el carro



A continuación se muestran los resultados de la radial 1 y la radial 2 para el sistema  
RFID

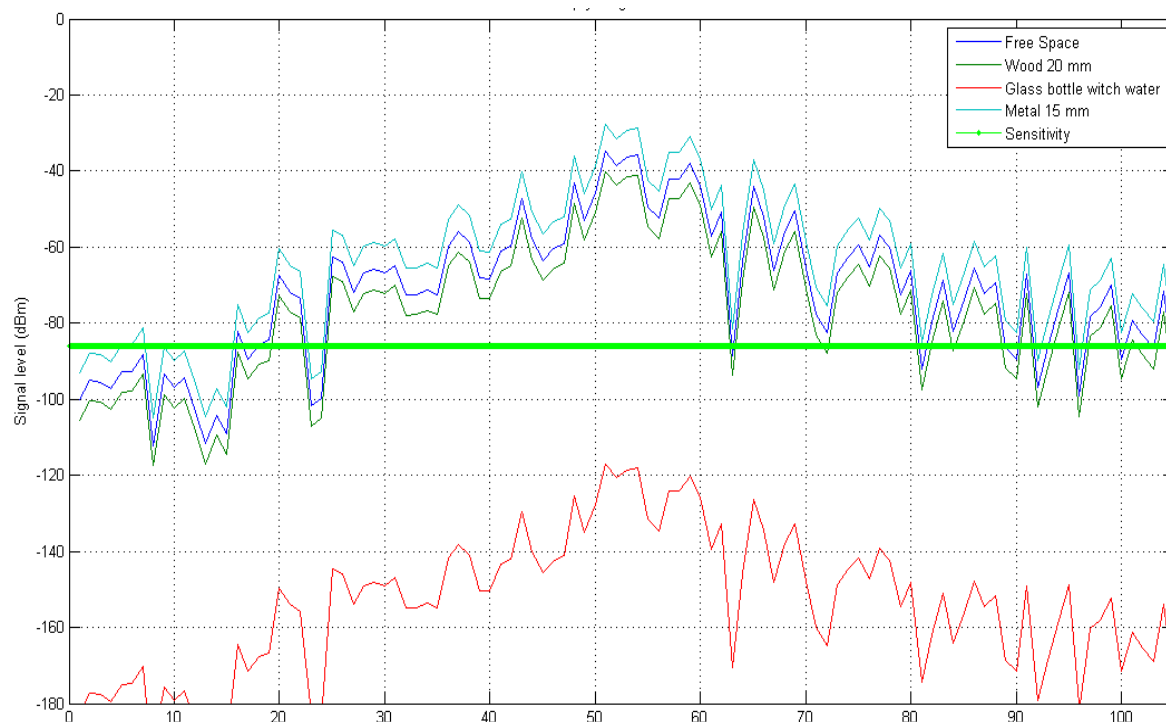


Figura 3. 42. Nivel de señal a 0.5 metros para diferentes materiales de etiqueta (Radial 1 RFID)

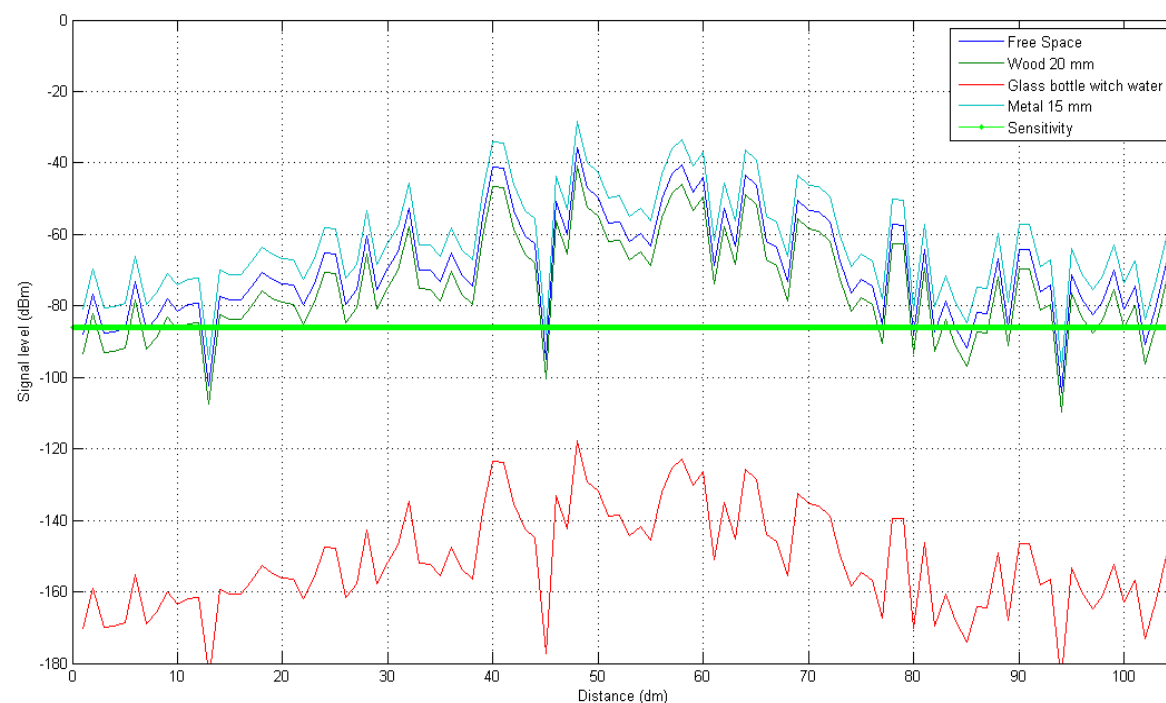
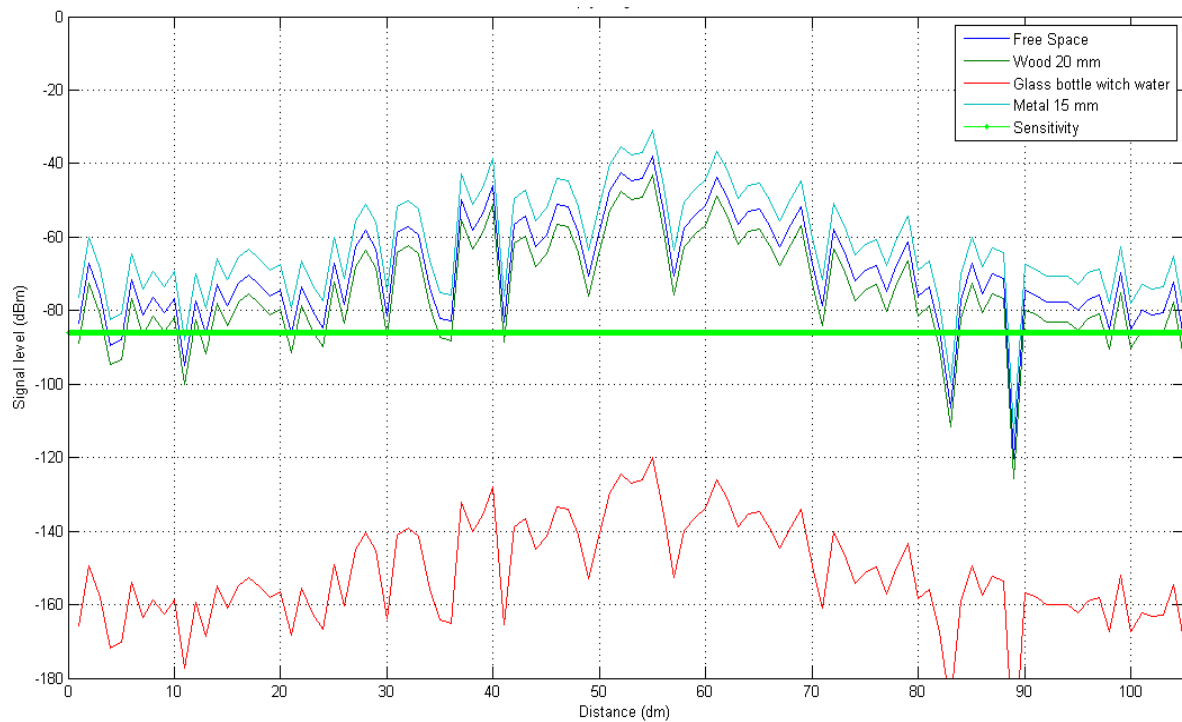
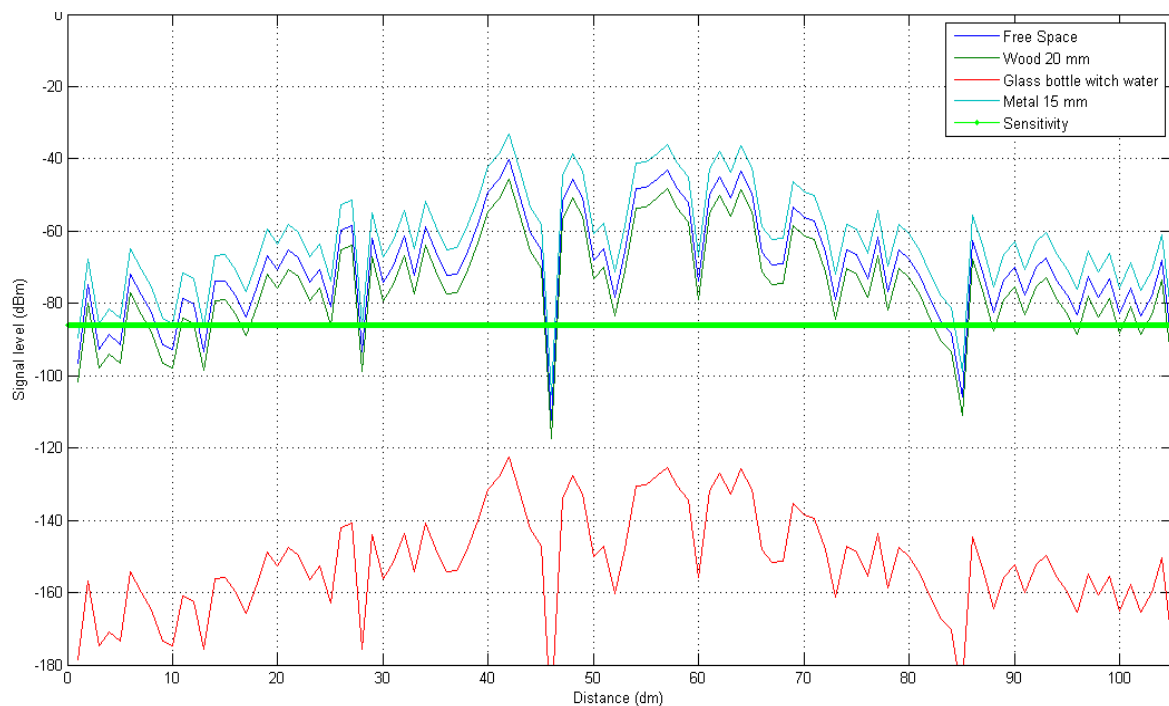


Figura 3. 43. Nivel de señal a 1.5 metros para diferentes materiales de etiqueta (Radial 1 RFID)



**Figura 3. 44. Nivel de señal a 0.5 metros para diferentes materiales de etiqueta (Radial 2 RFID)**



**Figura 3. 45. Nivel de señal a 1.5 metros para diferentes materiales de etiqueta (Radial 2 RFID)**

Se observa que la comunicación puede ser viable siempre y cuando la etiqueta RFID este colocada sobre un material con cierta ganancia como el metal, si la etiqueta esta sobre un material como el vidrio con agua entonces los niveles de señal disminuyen significativamente haciendo la comunicación inviable.

## 3.5. Introducción de elementos en las estanterías

Hasta este punto se han analizado los escenarios con las estanterías vacías. Como el objetivo principal de este trabajo es el estudio de la viabilidad de una comunicación entre el carro y los productos de un área comercial, vamos a introducir elementos en las estanterías.

El escenario a simular es el siguiente.

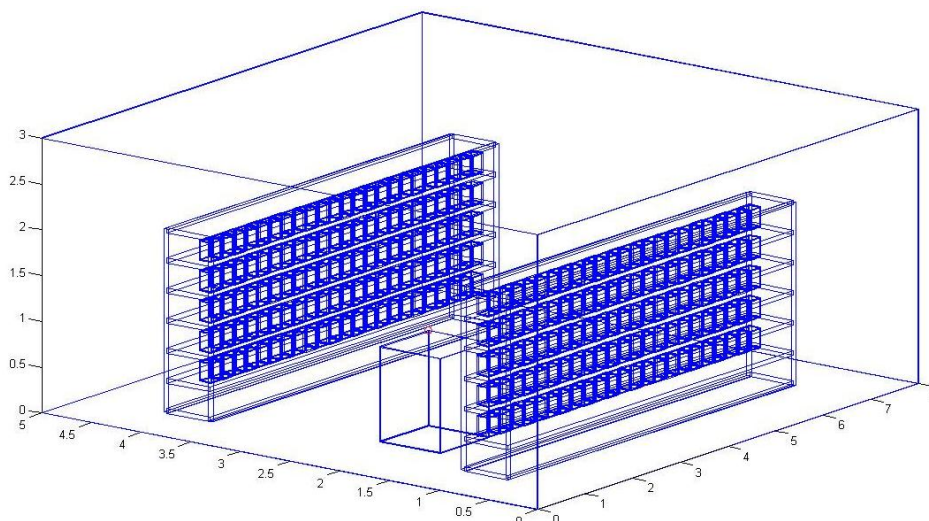


Figura 3. 46. Vista en 3D del escenario

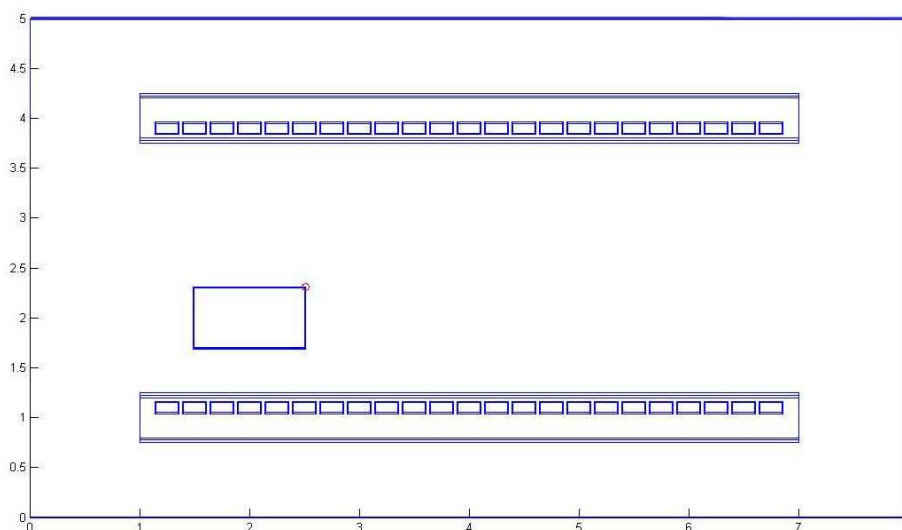


Figura 3. 47. Planta del escenario

Tiene las mismas dimensiones que el escenario analizado en el punto 3.2.1. La posición de antena se ha colocado en la esquina superior del carro, teniendo en cuenta las conclusiones obtenidas en el apartado 3.2.3.

Los elementos que se introducen en las estanterías tienen unas dimensiones de 0.20 m (largo) x 0.10 m (ancho) x 0.20 m (alto).

Según las propiedades que se le han otorgado a cada elemento se han creado cuatro objetos diferentes:

1. Cartón
2. Cristal
3. Metal
4. Plástico

A continuación se va a analizar el efecto que produce la introducción de objetos de distintos materiales en las estanterías. Estos resultados se compararan con los resultados obtenidos con las estanterías vacías.

Para ver detalladamente como varía el nivel de señal según el tipo de material de los objetos que están en la estantería, se ha creado una serie de radiales. Estas radiales están representadas en la siguiente figura.

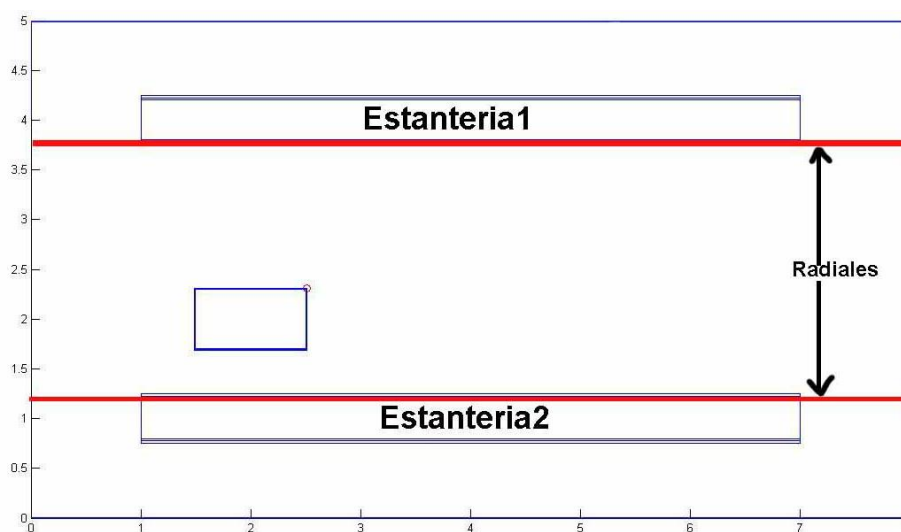


Figura 3. 48. Ubicación de las Radiales

A continuación se va a analizar el comportamiento del sistema RFID, en el Anexo 3 se encuentra todo el análisis correspondiente al sistema ZigBee

### 3.5.1. Objetos de Cartón

Vamos a analizar detalladamente como afecta la presencia de objetos de cartón en las estanterías. Para ello vamos a representar un plano de nivel de potencia y dos radiales a diferente altura en cada estantería.

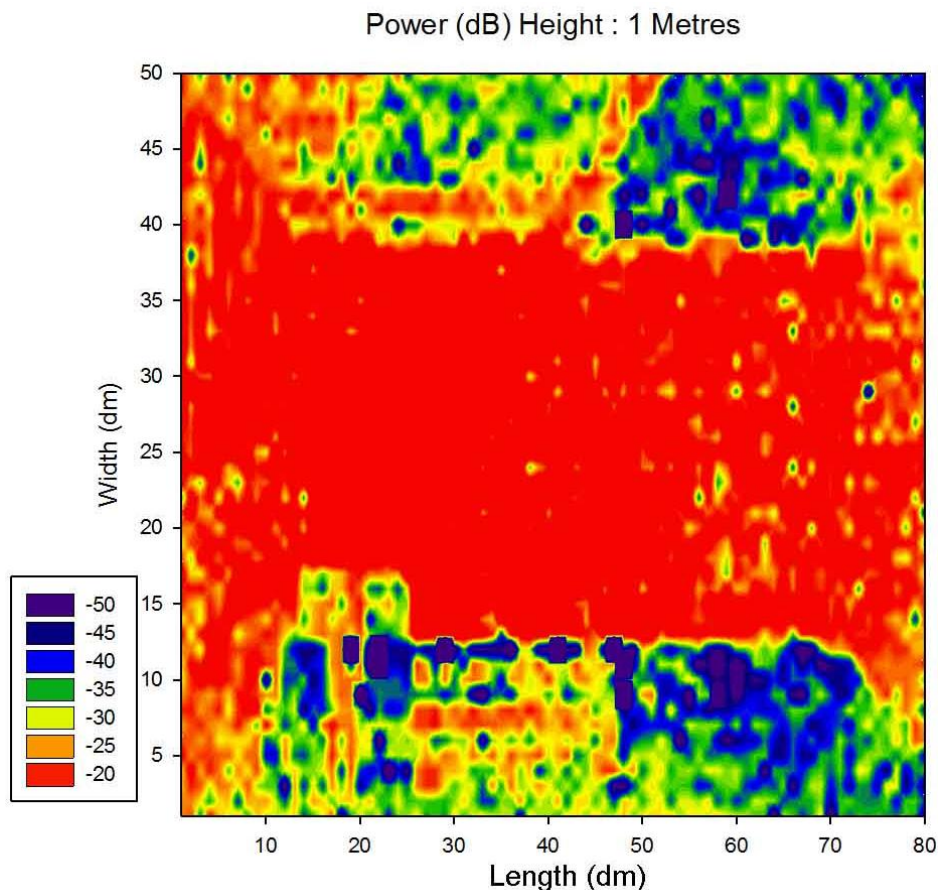
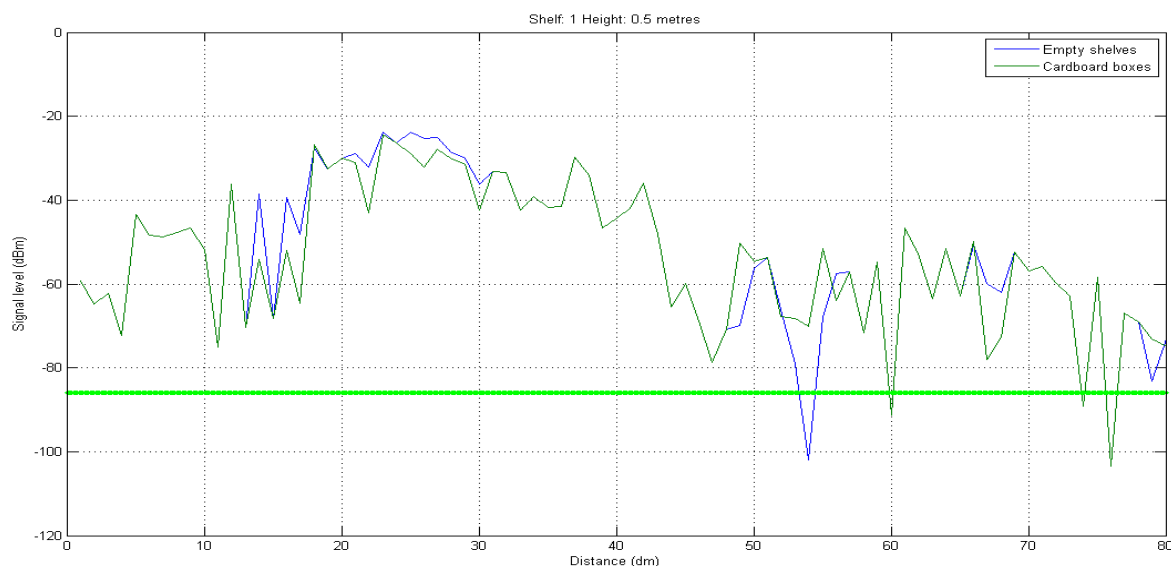


Figura 3. 49. Nivel de señal a 1 metro de altura con objetos de cartón en las estanterías

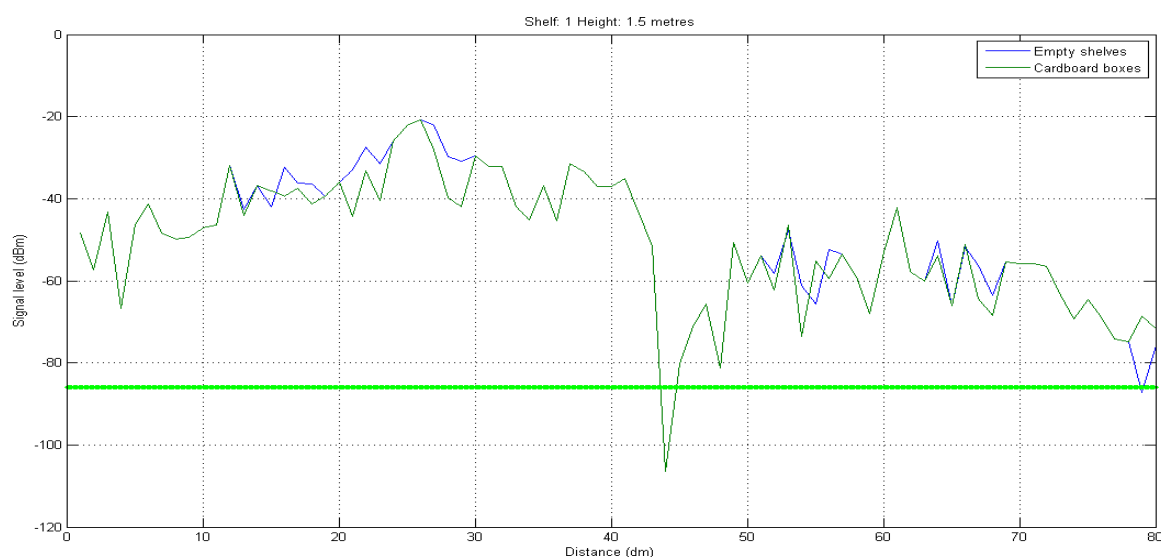
Como el gráfico anterior no nos permite obtener muchas conclusiones de cómo afecta la introducción de objetos de cartón en las estanterías, vamos a ver detalladamente en los siguientes apartados una serie de radiales para cada estantería.

### 3.5.1.1. Estantería 1

La estantería 1, es la que se encuentra más alejada del carro, como se puede ver en la figura 3.48. Se ha trazado una radial a lo largo de ella a la altura de 0.5 y 1.5 metros de altura para ver detalladamente el nivel de señal en cada punto.



**Figura 3. 50. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cartón (verde)**



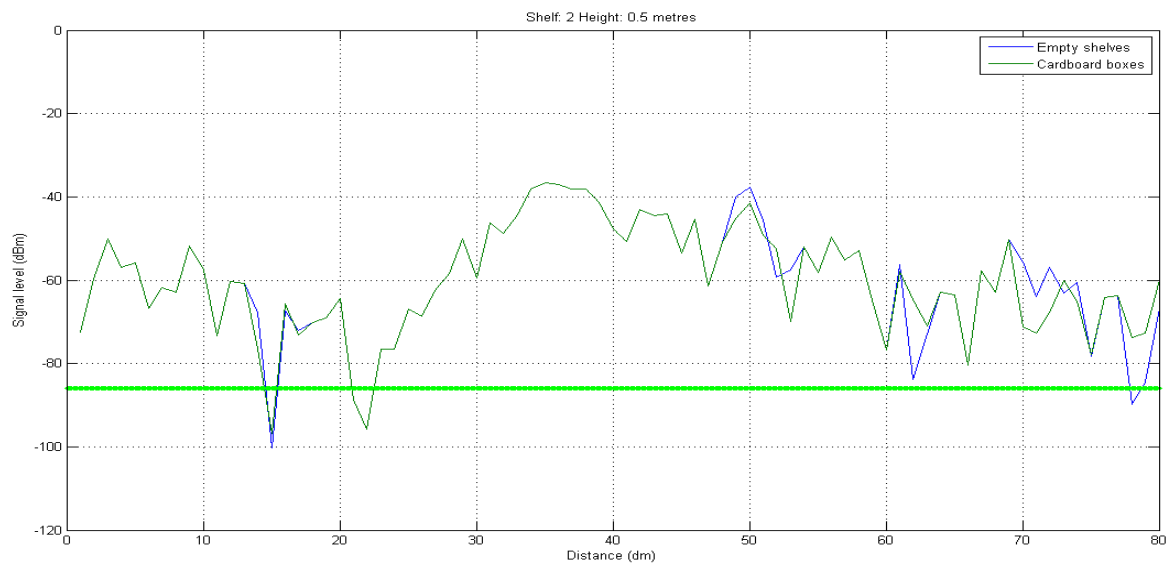
**Figura 3. 51. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cartón (verde)**

Mediante estas radiales hemos intentamos ver como afecta la el nivel de señal en la estantería 1. Observamos que los niveles de potencia para estanterías vacías y con objetos de cartón son bastante parecidos a lo largo de toda la estantería.

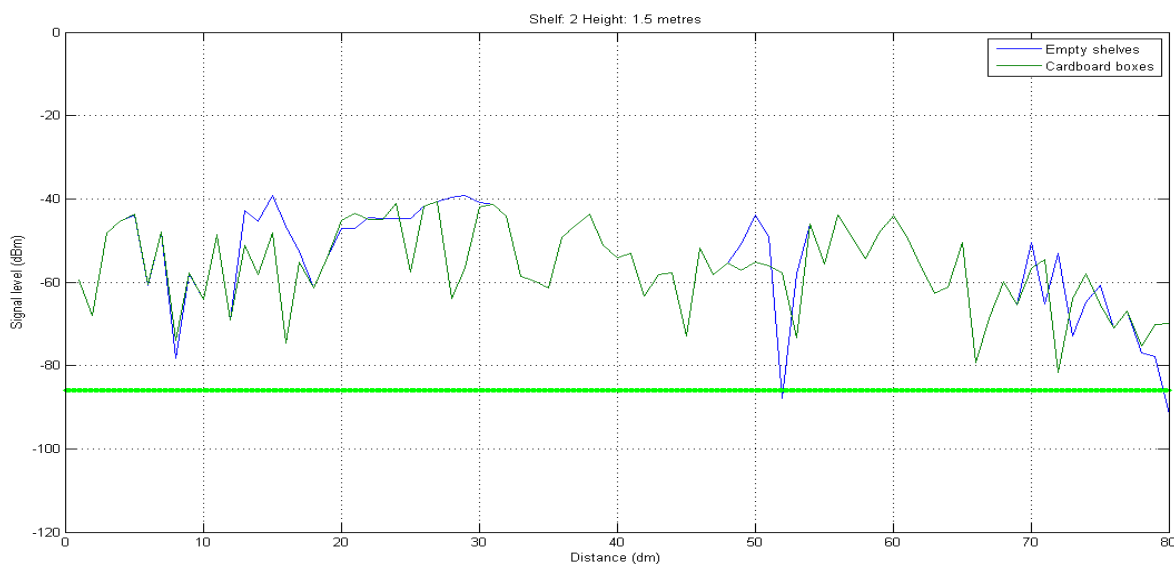
Se podría destacar que a la altura de 0.5 metros a 5,5 metros aproximadamente de distancia, existe un punto para las estanterías vacías por debajo de la sensibilidad del lector, que no se da cuando las estanterías están llenas.

### 3.5.1.2. Estantería 2

La estantería 2, es la que se encuentra más cerca del carro, como se puede ver en la figura 3.48. Al igual que para la estantería 1 se han realizado dos radiales a las alturas de 0.5 y 1.5 metros.



**Figura 3. 52. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 2 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cartón (verde)**



**Figura 3. 53. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 2 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cartón (verde)**

estantería 2. Observamos que los niveles de potencia para estanterías vacías y con objetos de cartón son bastante parecidos a lo largo de toda la estantería.

## 3.5.2. Objetos de Cristal

En este otro caso vamos a analizar como afecta la presencia de objetos de cristal en las estanterías. Para ello vamos a representar un plano de nivel de potencia y dos radiales a diferente altura en cada estantería.



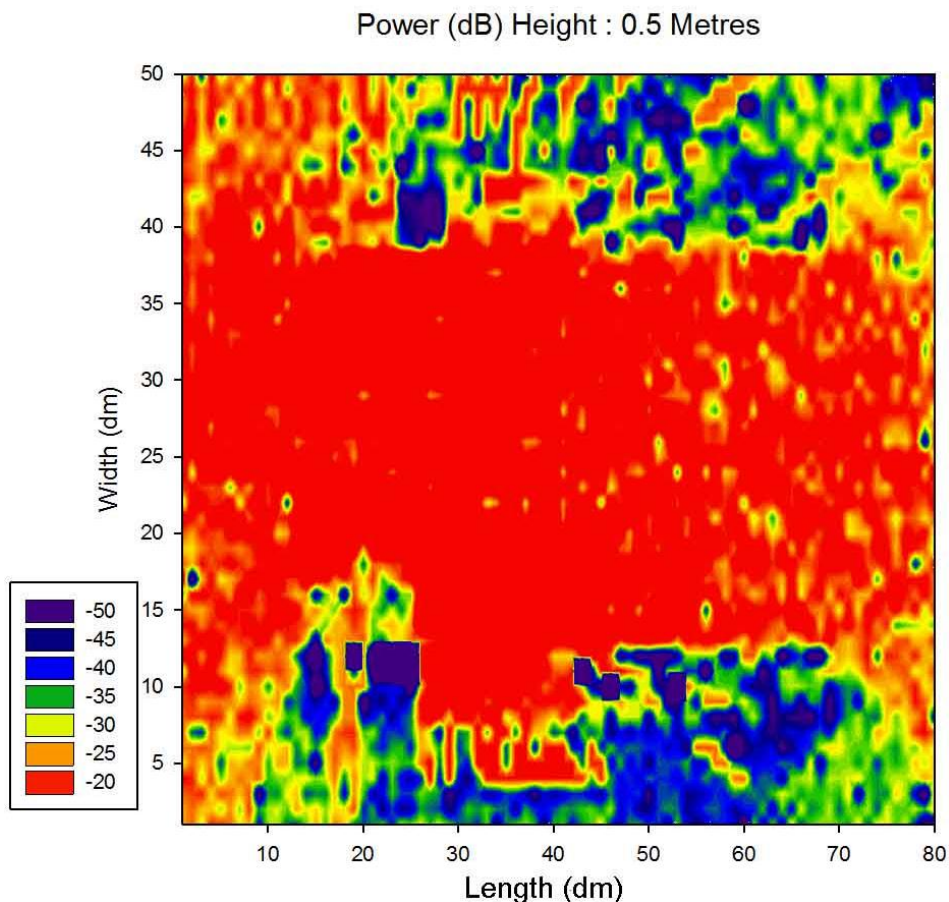


Figura 3. 54. Nivel de señal a 0.5 metros de altura con objetos de cristal en las estanterías

### 3.5.2.1. Estantería 1

La estantería 1, es la que se encuentra más alejada del carro, como se puede ver en la figura 3.48. Se ha trazado una radial a lo largo de ella a la altura de 0.5 y 1.5 metros de altura para ver detalladamente el nivel de señal en cada punto.

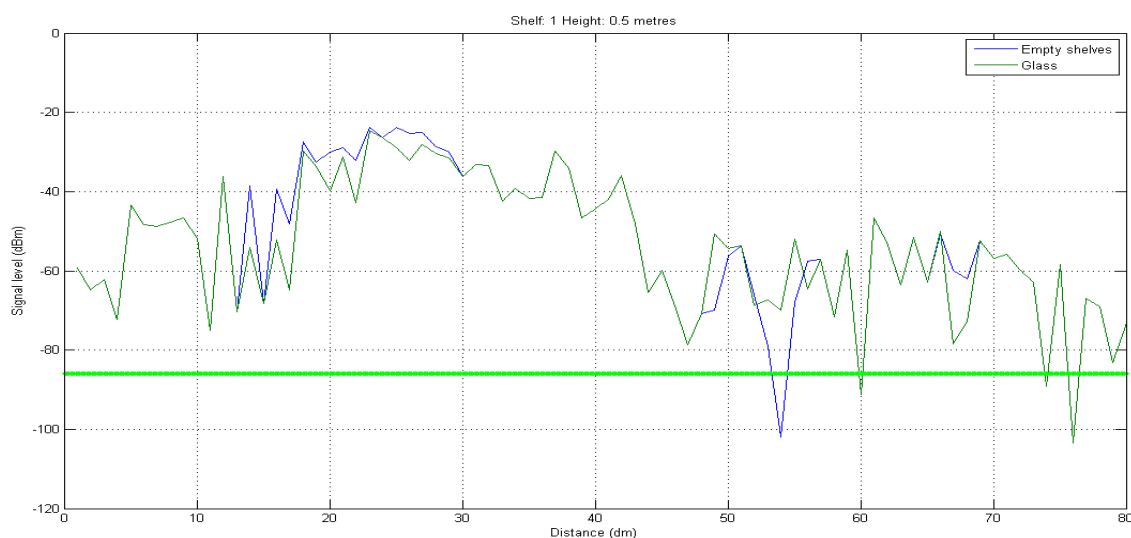
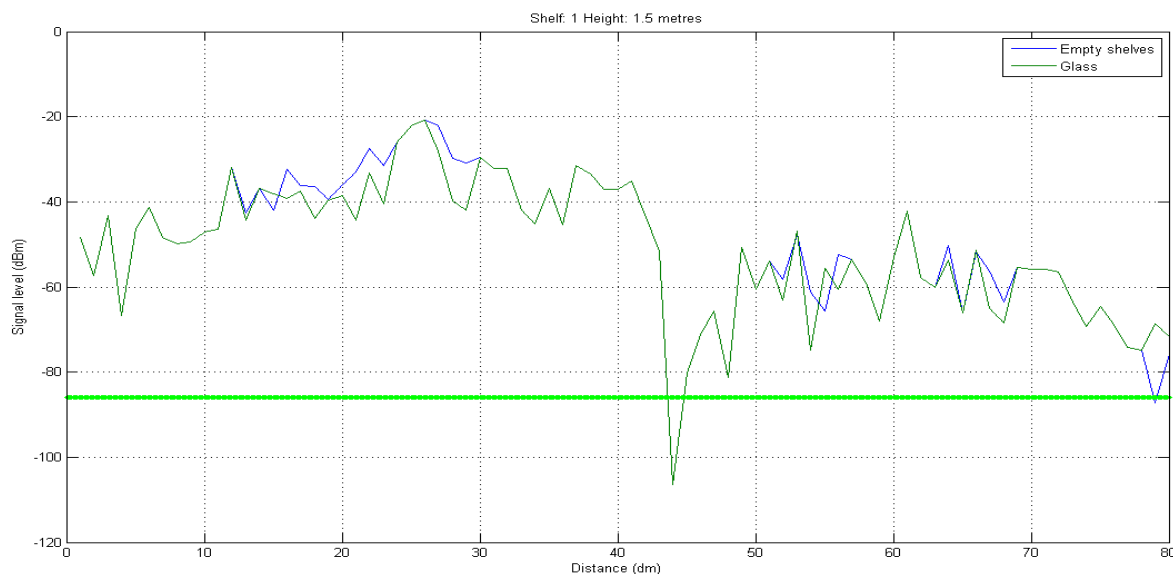


Figura 3. 55. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cristal (verde)



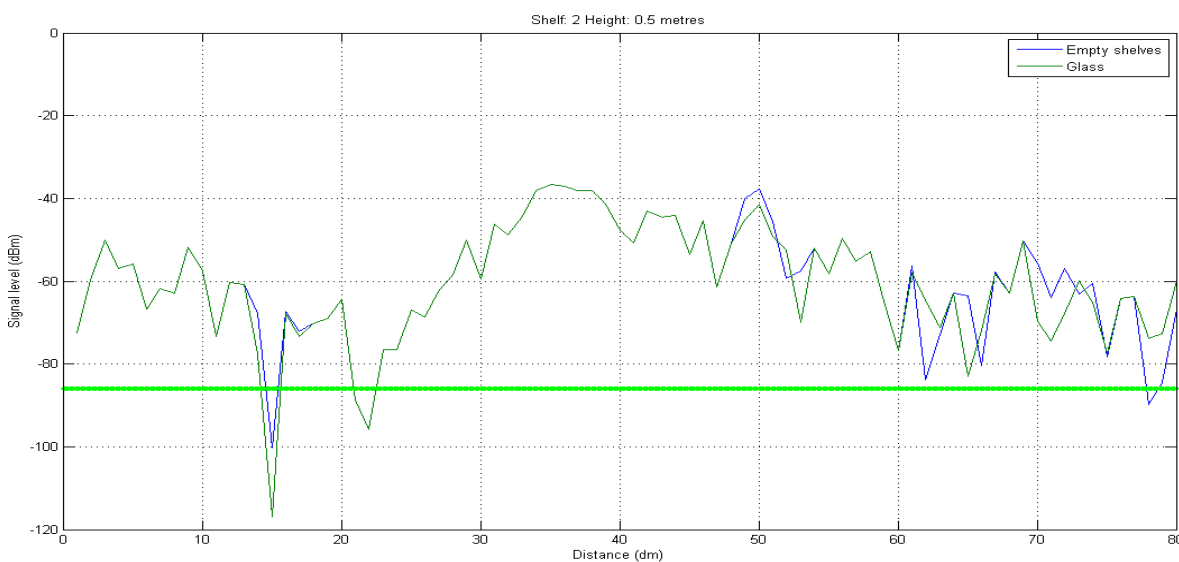


**Figura 3. 56. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cristal (verde)**

Observamos que el comportamiento entre el del vidrio no difiere mucho del que tenía el cartón en el apartado anterior. Se pueden observar algunos cambios de nivel en puntos concretos pero la presencia de objetos de vidrio en las estanterías no provoca ninguna variación significativa en el nivel de potencia de la estantería 1.

### 3.5.2.2. Estantería 2

La estantería 2, es la que se encuentra más cerca del carro, como se puede ver en la figura 3.48. Al igual que para la estantería 1 se han realizado dos radiales a las alturas de 0.5 y 1.5 metros.



**Figura 3. 57. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 2 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cristal (verde)**

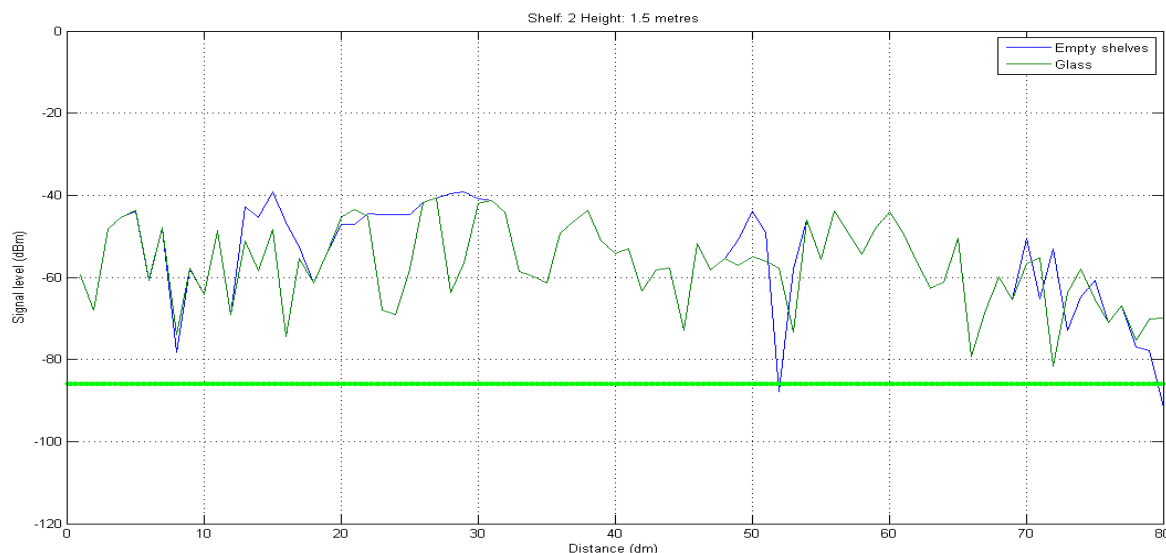


Figura 3. 58. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 2 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cristal (verde)

Como hemos dicho antes en el apartado 3.5.1.1 Se pueden observar algunos cambios de nivel en puntos concretos pero la presencia de objetos de vidrio en las estanterías no provoca ninguna variación significativa en el nivel de potencia de la estantería 2.

### 3.5.3. Objetos de Metal

Vamos a analizar detalladamente como afecta la presencia de objetos de Metal en las estanterías. Para ello vamos a representar un plano de nivel de potencia y dos radiales a diferente altura en cada estantería.

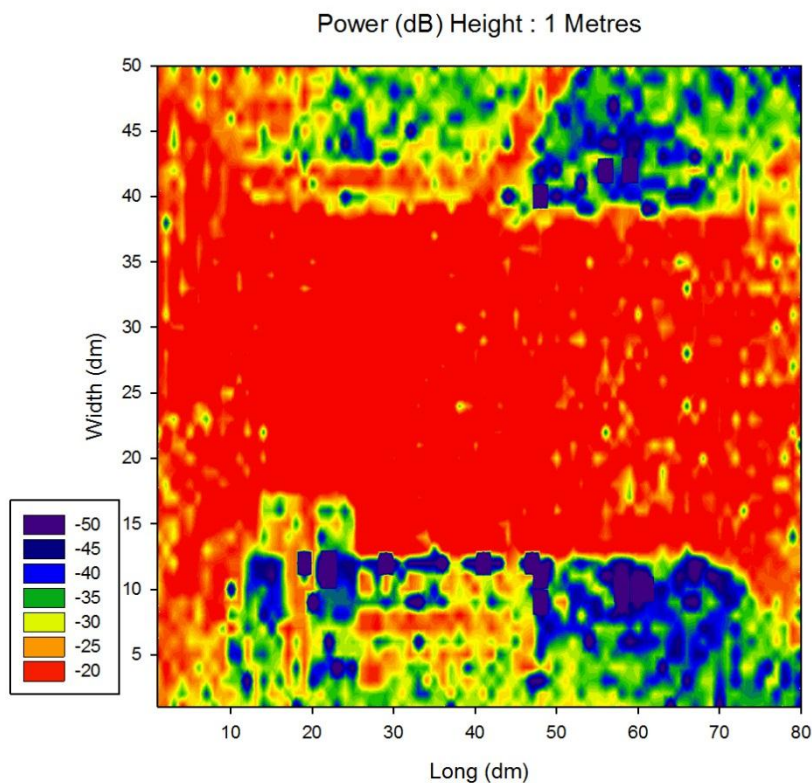
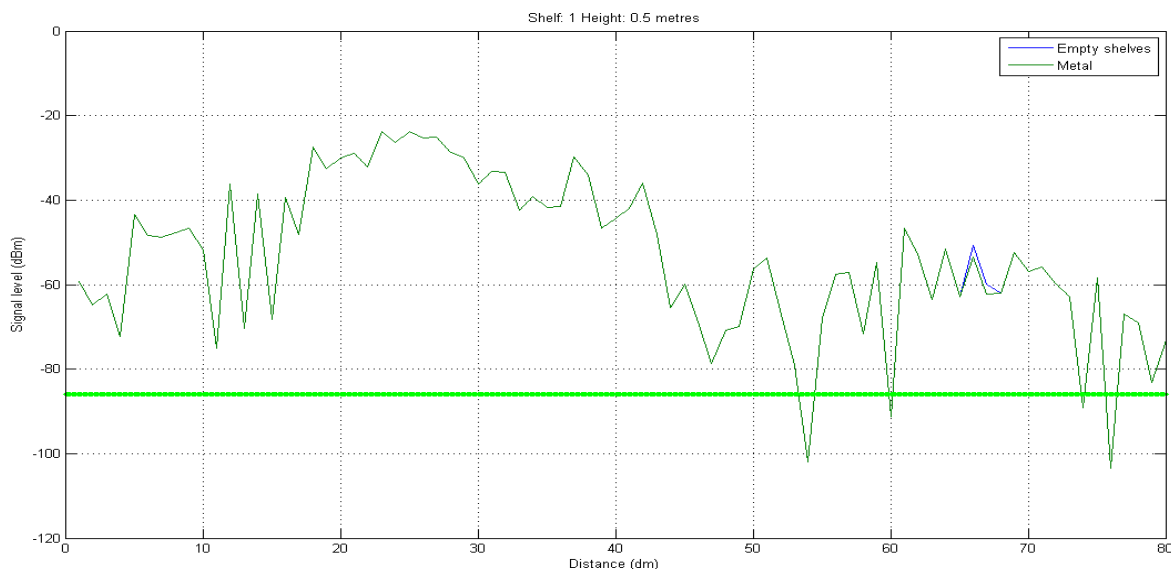


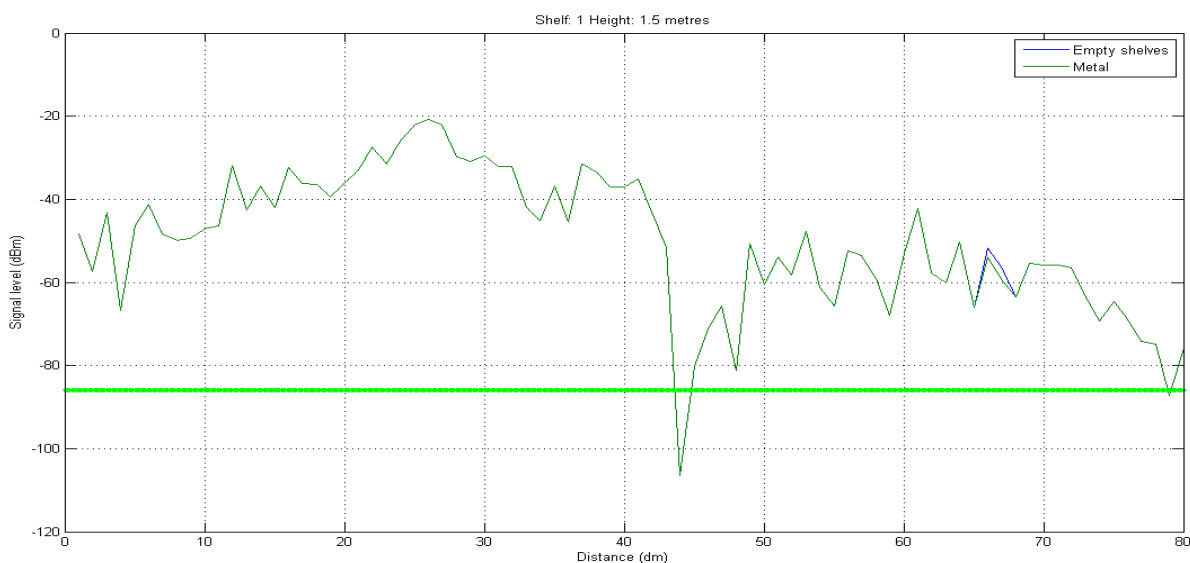
Figura 3. 59. Nivel de señal a 0.5 metros de altura con objetos de metal en las estanterías

### 3.5.3.1. Estantería 1

La estantería 1, es la que se encuentra más alejada del carro, como se puede ver en la figura 3.48. Se ha trazado una radial a lo largo de ella a la altura de 0.5 y 1.5 metros de altura para ver detalladamente el nivel de señal en cada punto.



**Figura 3. 60. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de metal (verde)**

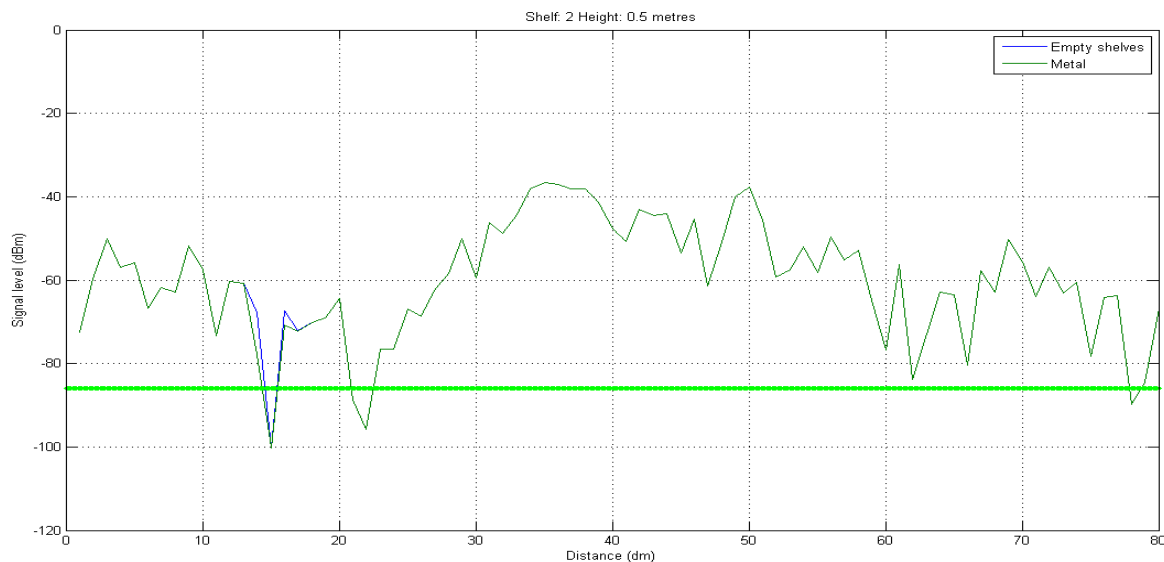


**Figura 3. 61. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de metal (verde)**

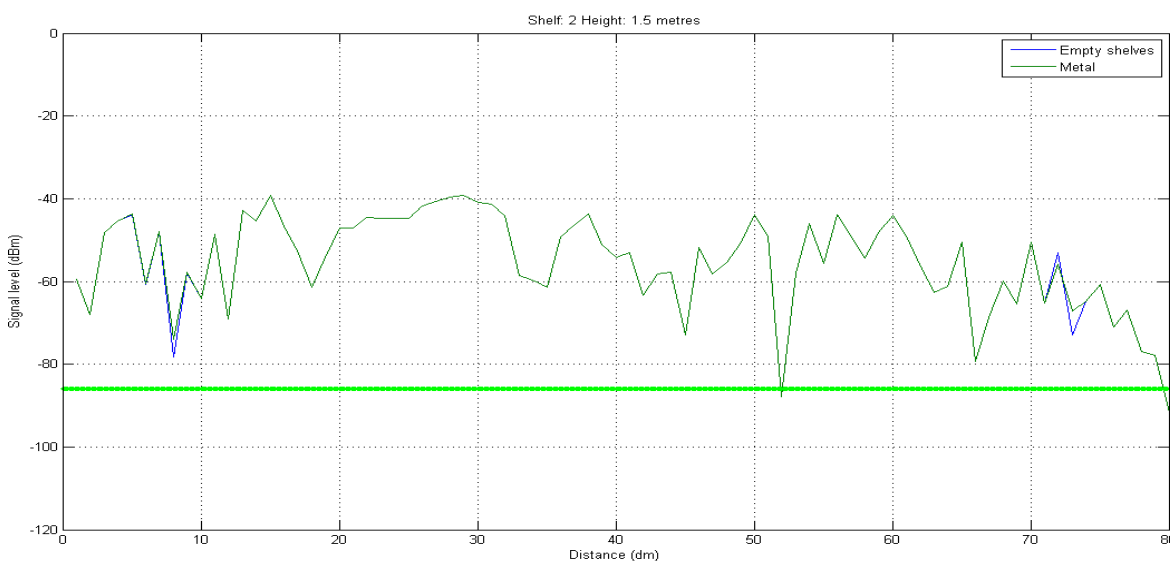
Si observamos la gráficas nos damos cuenta de que la señal es prácticamente idéntica para el caso en el que las estanterías están vacías y para el caso en el que las estanterías están con objetos de metal. Este fenómeno ocurre porque las estanterías están formadas por un material metálico, por lo tanto la colocación de objetos metálicos en ella no supone un cambio considerable en el efecto de radiopropagación.

### 3.5.3.2. Estantería 2

La estantería 2, es la que se encuentra más cerca del carro, como se puede ver en la figura 3.48. Al igual que para la estantería 1 se han realizado dos radiales a las alturas de 0.5 y 1.5 metros.



**Figura 3. 62. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 2 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de metal (verde)**



**Figura 3. 63. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 2 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de metal (verde)**

Para el caso de esta segunda estantería ocurre exactamente el mismo fenómeno que el explicado para la estantería 1.

### 3.5.4. Objetos de plástico

Vamos a analizar detalladamente como afecta la presencia de objetos de plástico en las estanterías. Para ello vamos a representar un plano de nivel de potencia y dos radiales a diferente altura en cada estantería.

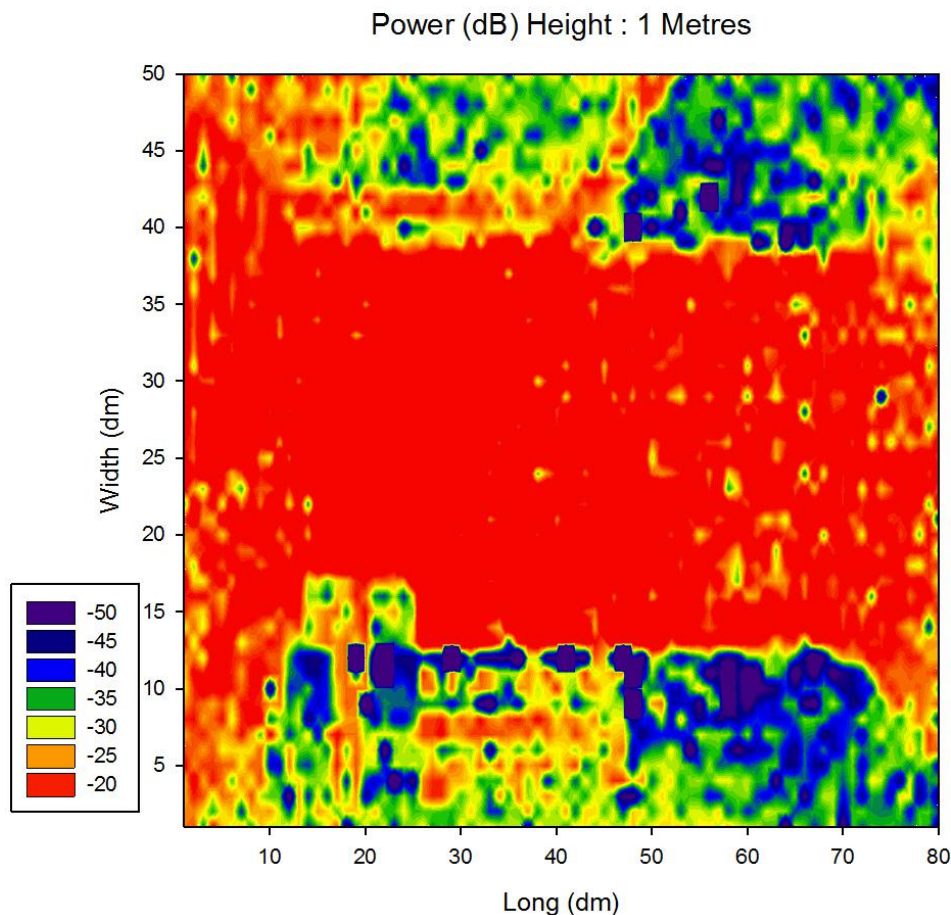


Figura 3. 64. Nivel de señal a 0.5 metros de altura con objetos de cristal en las estanterías

### 3.5.4.1. Estantería 1

La estantería 1, es la que se encuentra más alejada del carro, como se puede ver en la figura 3.48. Se ha trazado una radial a lo largo de ella a la altura de 0.5 y 1.5 metros de altura para ver detalladamente el nivel de señal en cada punto.

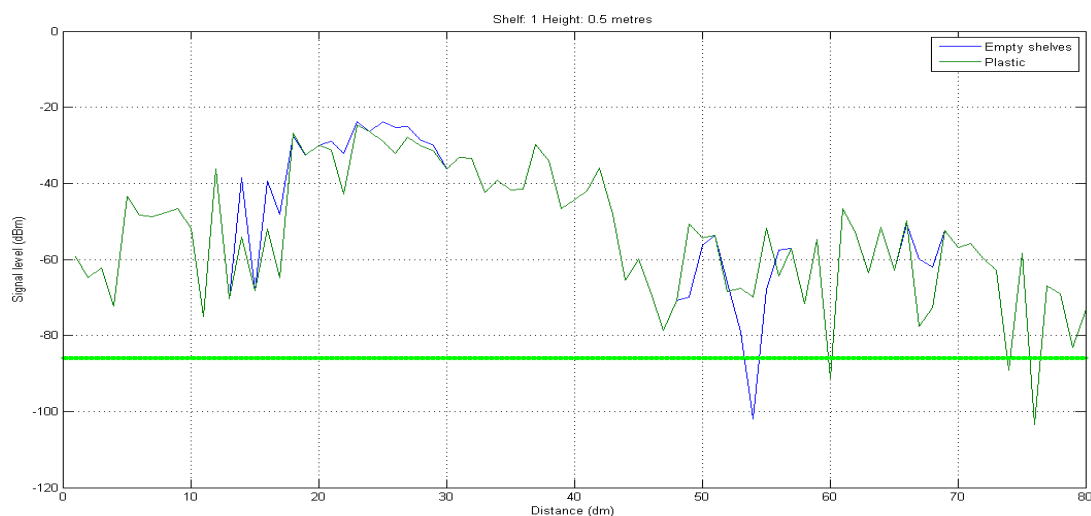
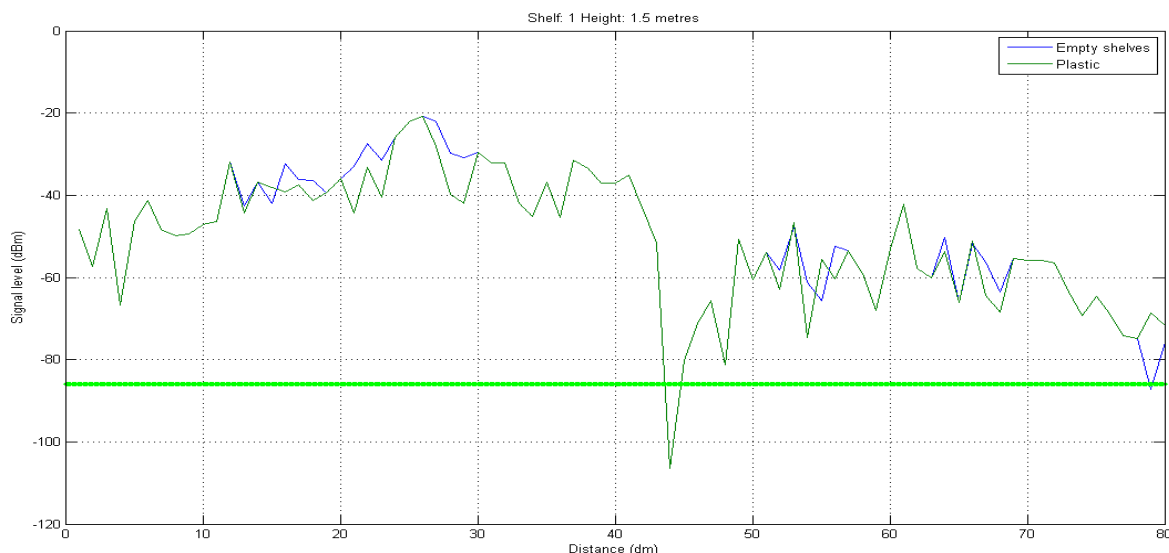


Figura 3. 65. Nivel de señal a 0.5 metros e n la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de plástico (verde)

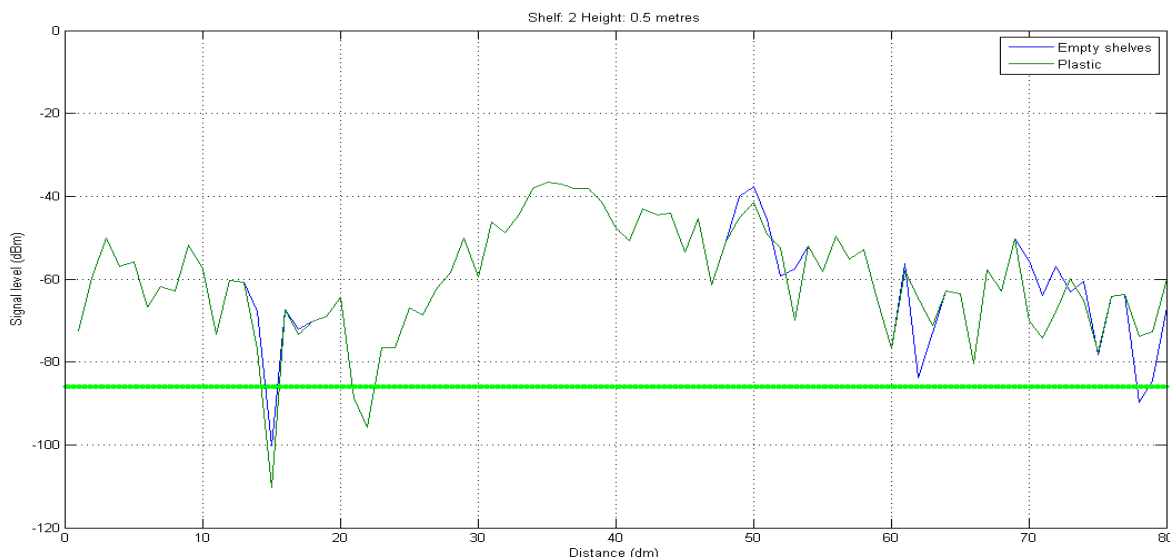


**Figura 3. 66. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de plástico (verde)**

Observamos que en algunos puntos el nivel de potencia no es el mismo, cuando las estanterías están llenas o vacías, pero en general y exceptuado algún punto concreto, el escenario con cajas de plástico se comporta de forma parecida al escenario vacío.

### 3.5.4.2. Estantería 2

La estantería 2, es la que se encuentra más cerca del carro, como se puede ver en la figura 3.48. Al igual que para la estantería 1 se han realizado dos radiales a las alturas de 0.5 y 1.5 metros.



**Figura 3. 67. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 2 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de plástico (verde)**

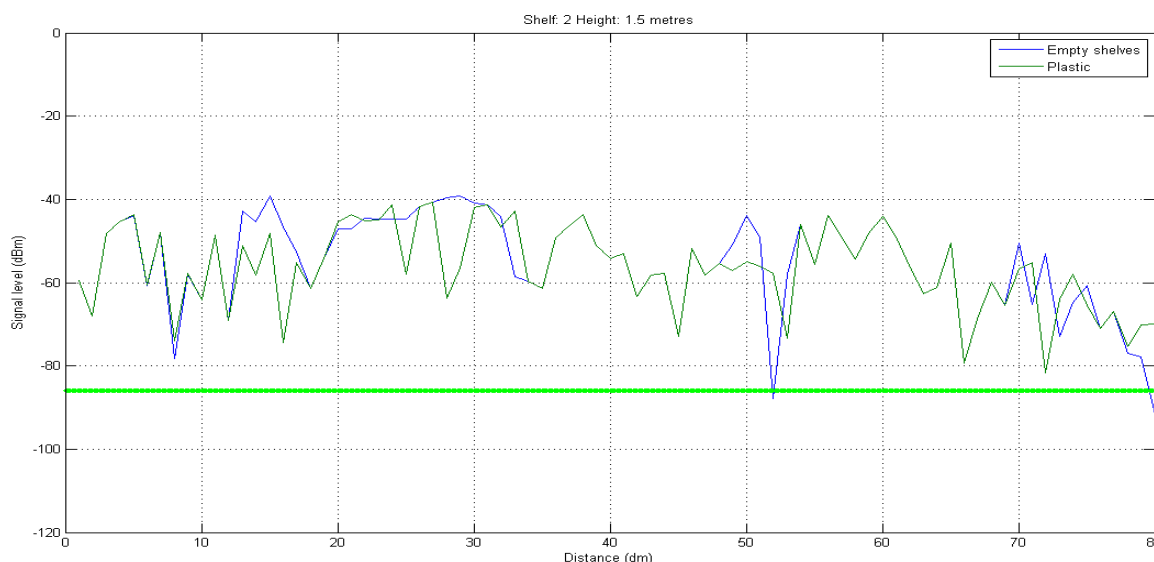


Figura 3. 68. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 2 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de plástico (verde)

Para el caso de la estantería 2 hay mayor diferencia que en la estantería 1 del nivel de potencia, cuando el escenario esta lleno o vacío.

## 3.6. Carro Plástico en escenario con estanterías ocupadas

Una vez analizado los cuatro casos anteriores donde colocábamos objetos de cartón, cristal, metal y plástico en las estanterías, vamos a cambiar el tipo de material del carro.

Vamos analizar el comportamiento de un carro de plástico en un escenario como el de la figura 3.46

En el momento en el que todos los productos estén identificados por una etiqueta de radiofrecuencia, las cintas de las cajas de cobro, al igual que los carritos metálicos de los supermercados están llamados a desaparecer, siendo sustituidos por carritos de autoservicio de plástico y arcos de lectura por radiofrecuencia.

De esta forma, con sólo atravesar un arco lector podremos tener nuestro ticket del supermercado listo sin depositar uno a uno los productos sobre la cinta de caja, con el consiguiente ahorro, aumento de la eficiencia y mejora de la experiencia de compra al eliminar virtualmente las colas de salida.

El carrito de autoservicio metálico produce interferencias cuando es leído por un arco-scanner reduciendo la fiabilidad. Por este motivo tiene sentido el estudio de los escenarios anteriores empleando un carro de la compra de plástico

Los resultados obtenidos con este nuevo carro los compararemos con los resultados obtenidos en el apartado 3.6. donde el carro era de metal.

A continuación se van a mostrar una serie de radiales ubicadas en la estantería 1 y 2 (como muestra la figura 3.69.), que nos permitirán comprobar como afecta el material del carro en un entorno comercial.



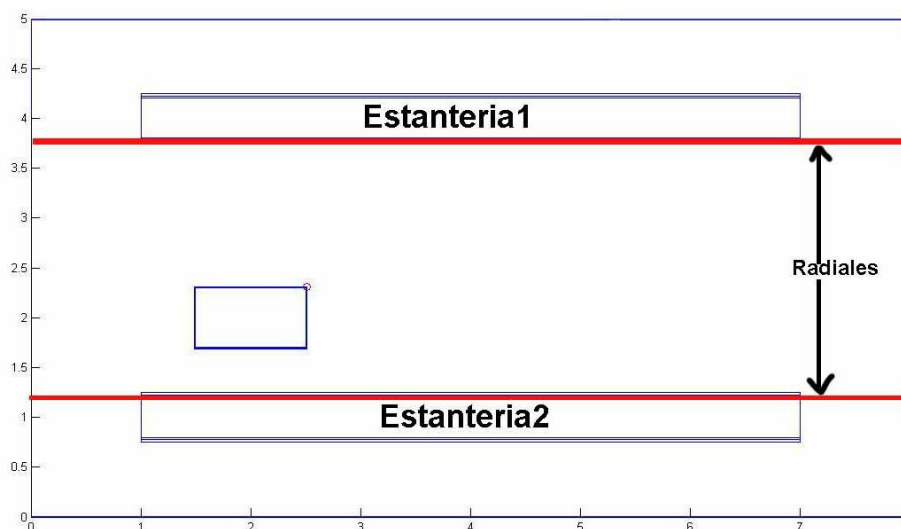


Figura 3. 69. Ubicación de las radiales

## 3.6.1. Objetos de cartón

Vamos a analizar el comportamiento de un carro de plástico, cuando en las estanterías estas llenas de objetos de cartón. Los resultados obtenidos los compararemos con los resultados obtenidos anteriormente cuando el carro de la compra era de metal

Se ha analizado el nivel de señal tanto para la estantería 1 como para la dos.

### 3.6.1.1. Estantería 1

La estantería 1, es la que se encuentra más alejada del carro, como se puede ver en la figura 3.69. Se ha trazado una radial a lo largo de ella a la altura de 0.5 y 1.5 metros de altura para ver detalladamente el nivel de señal en cada punto.

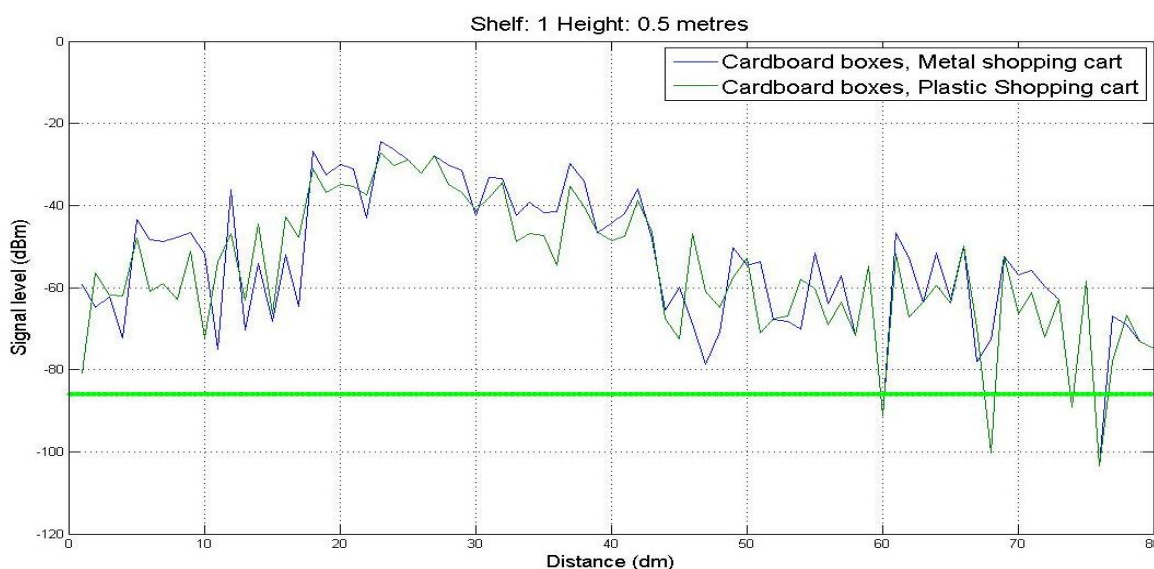
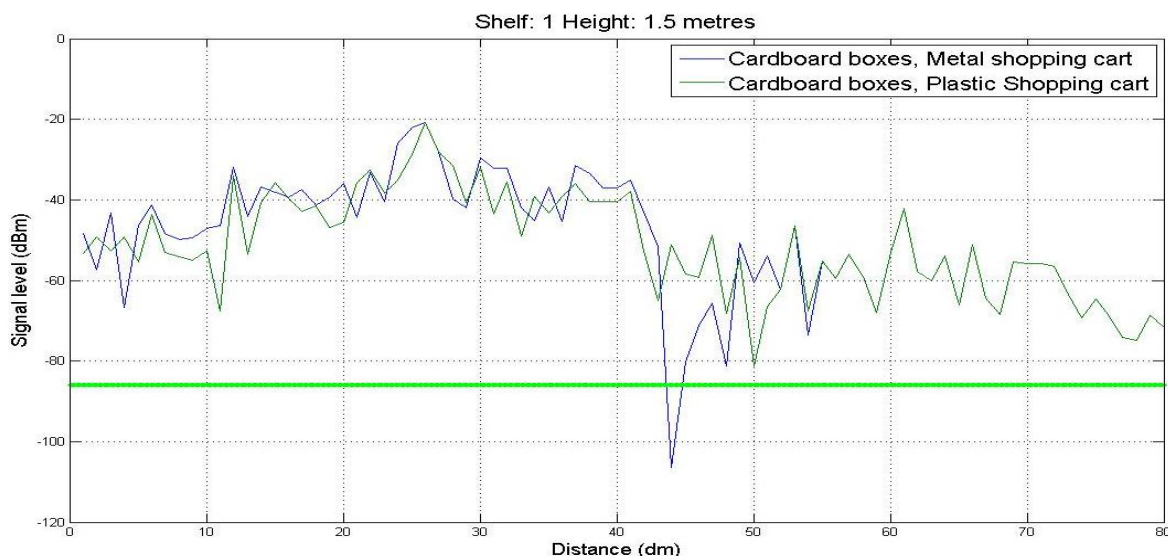


Figura 3. 70. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 1 con cajas de cartón utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde)





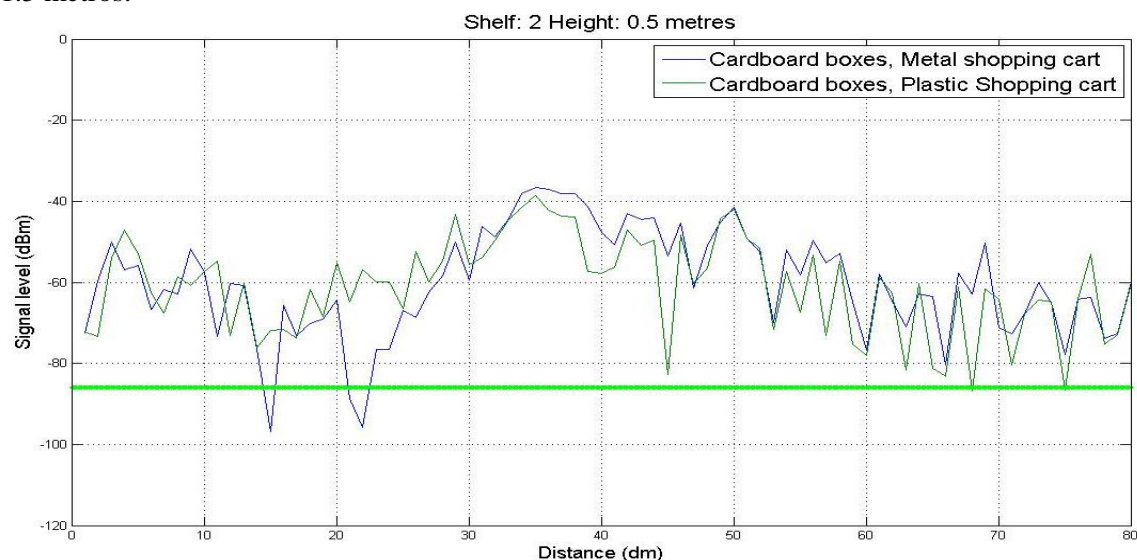
**Figura Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 1 con cajas de cartón utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde)**

En las gráficas anteriores se observa que el nivel de señal varía bastante respecto al nivel que se tenía anteriormente utilizando un carro de metal.

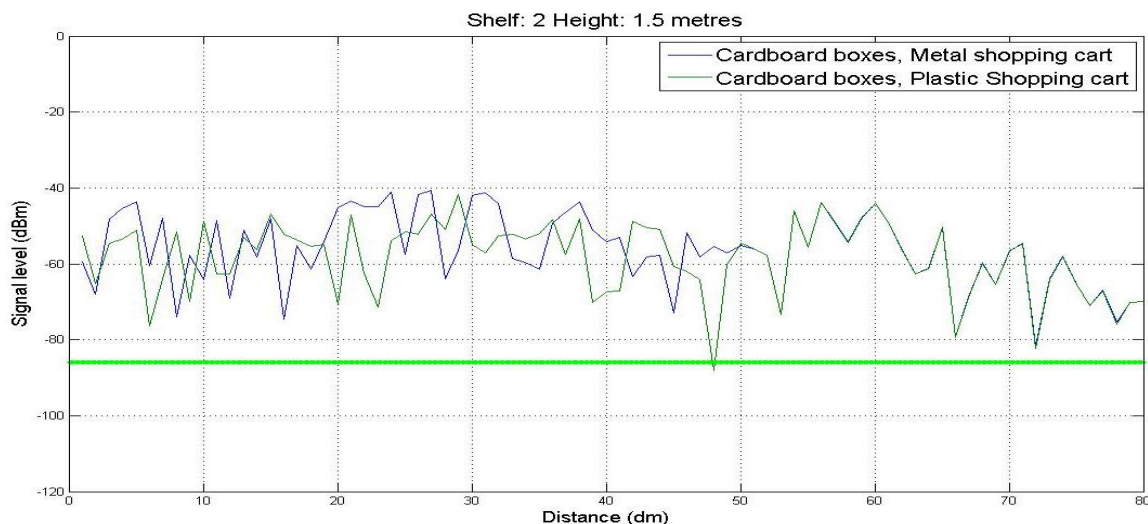
Se puede apreciar por ejemplo que a la altura de 1.5 metros a unos 4.5 si se usa un carro de metal el nivel de señal experimenta una caída de nivel considerada, con el uso de carro de plástico este fenómeno no sucede.

### 3.6.1.2. Estantería 2

La estantería 2, es la que se encuentra más cerca del carro, como se puede ver en la figura 3.69. Al igual que para la estantería 1 se han realizado dos radiales a las alturas de 0.5 y 1.5 metros.



**Figura 3. 71. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 2 con cajas de cartón utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde)**



**Figura 3. 72. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 2 con cajas de cartón utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde)**

Observamos que para el caso de la estantería 2 a alturas bajas funciona mejor el carro de plástico, en cambio para alturas mayores el carro de metal da niveles de potencia mayores también.

Se podría afirmar que el carro de plástico ofrece una respuesta más uniforme.

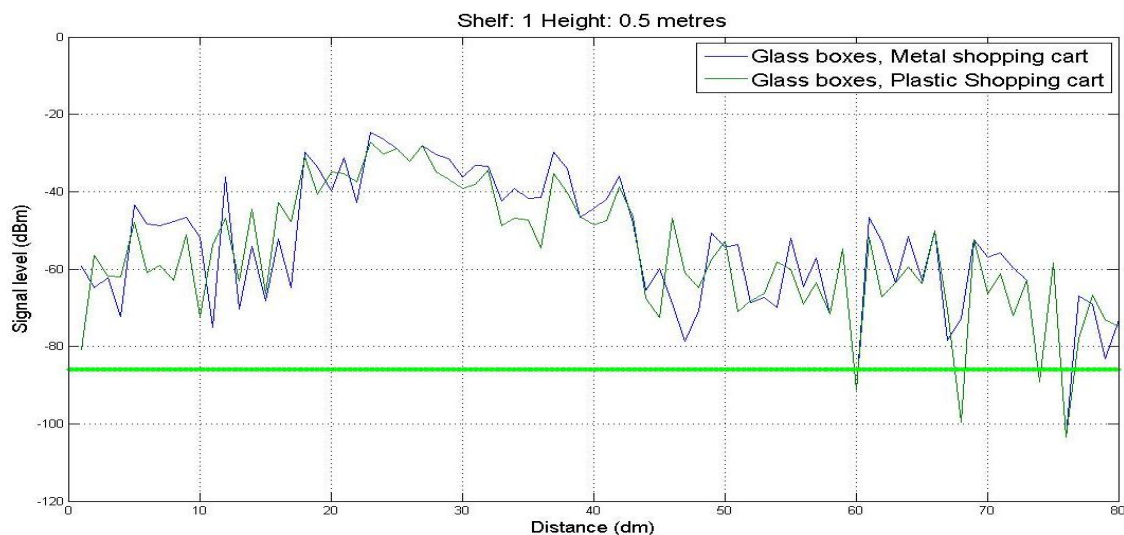
## 3.6.2. Objetos de Cristal

En este segundo caso se va analizar el comportamiento del carro de plástico en un escenario en el cual las estanterías están llenas de objetos de cristal.

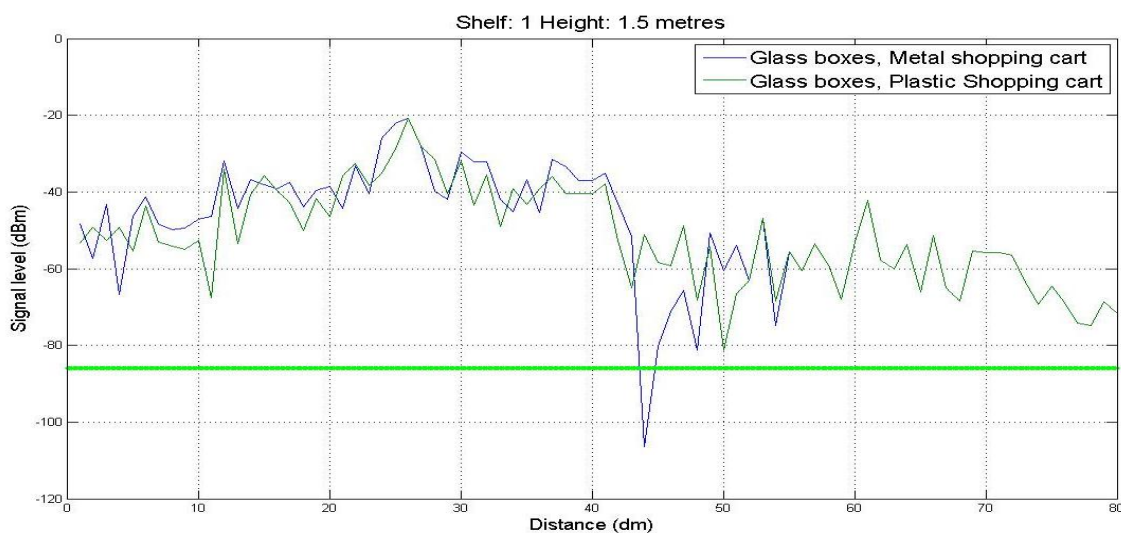
Compararemos los resultados obtenidos anteriormente utilizando un carro de metal con los resultados obtenidos con un carro de plástico.

### 3.6.2.1. Estantería 1

La estantería 1, es la que se encuentra más alejada del carro, como se puede ver en la figura 3.69. Se ha trazado una radial a lo largo de ella a la altura de 0.5 y 1.5 metros de altura para ver detalladamente el nivel de señal en cada punto.



**Figura 3. 73. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 1 con cajas de cristal utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde)**

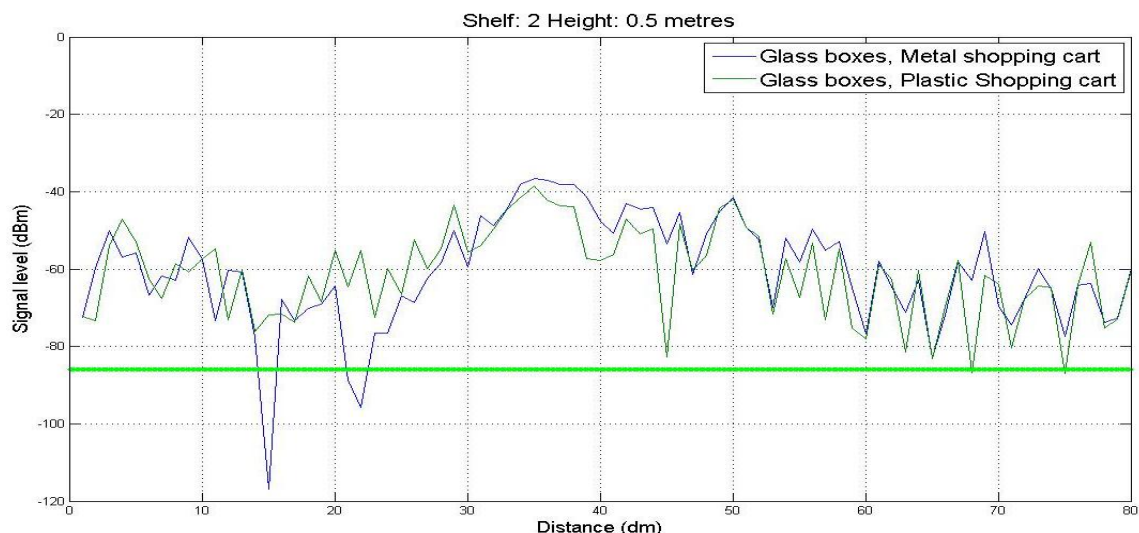


**Figura 3. 74. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 1 con cajas de cristal utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde)**

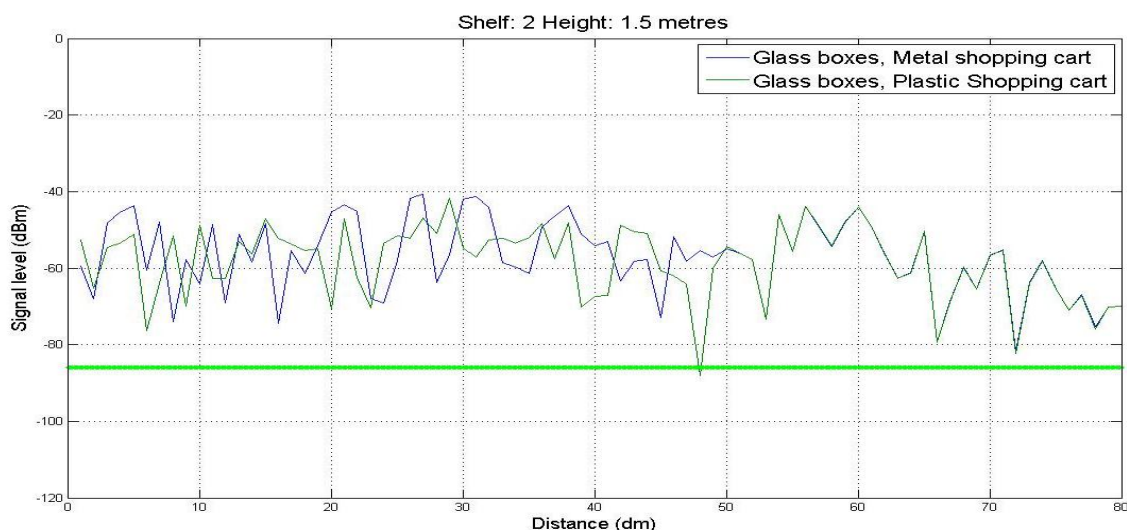
Observamos que el comportamiento entre el del vidrio no difiere mucho del que tenía el cartón en el apartado anterior. Se pueden observar algunos cambios de nivel en puntos concretos pero el comportamiento de objetos de vidrio en las estanterías es similar al que se tenía anteriormente para el cartón.

### 3.6.2.2. Estantería 2

La estantería 2, es la que se encuentra más cerca del carro, como se puede ver en la figura 3.69. Al igual que para la estantería 1 se han realizado dos radiales a las alturas de 0.5 y 1.5 metros.



**Figura 3. 75. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 2 con cajas de cristal utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde)**



**Figura 3. 76. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 2 con cajas de cristal utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde)**

Se puede afirmar que usando el carro de plástico eliminamos una caída de nivel existente con el uso de 1 carro de metal a la altura de 0.5 metros a 1.5 metros. Con el uso de carro de metal el nivel caía hasta -118 dB en cambio con el uso del carro de plástico elevamos el nivel de señal hasta unos -50 dB

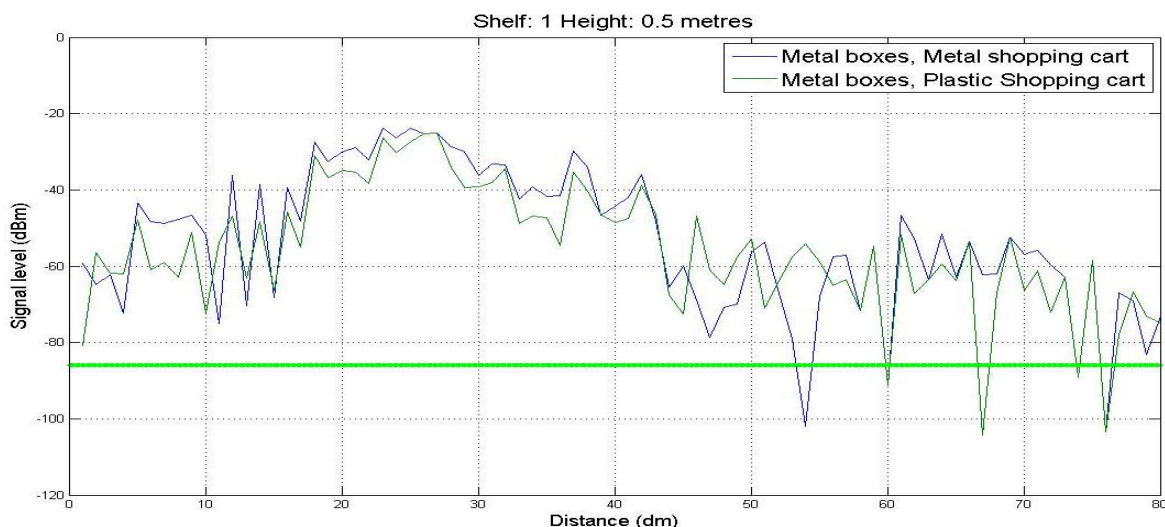
### 3.6.3. Objetos de Metal

Vamos a analizar el comportamiento de un carro de plástico, cuando en las estanterías estas llenas de objetos de metal. Los resultados obtenidos los compararemos con los resultados obtenidos anteriormente cuando el carro de la compra era de metal

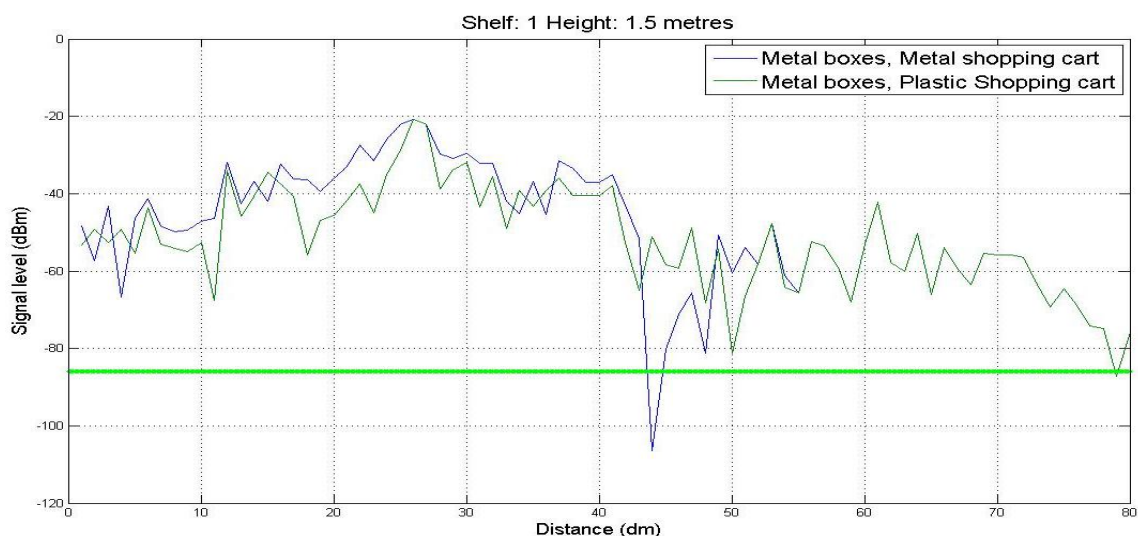
Se ha analizado el nivel de señal tanto para la estantería 1 como para la dos.

### 3.6.3.1. Estantería 1

La estantería 1, es la que se encuentra más alejada del carro, como se puede ver en la figura 3.69. Se ha trazado una radial a lo largo de ella a la altura de 0.5 y 1.5 metros de altura para ver detalladamente el nivel de señal en cada punto.



**Figura 3. 77. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 1 con cajas de metal utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde)**



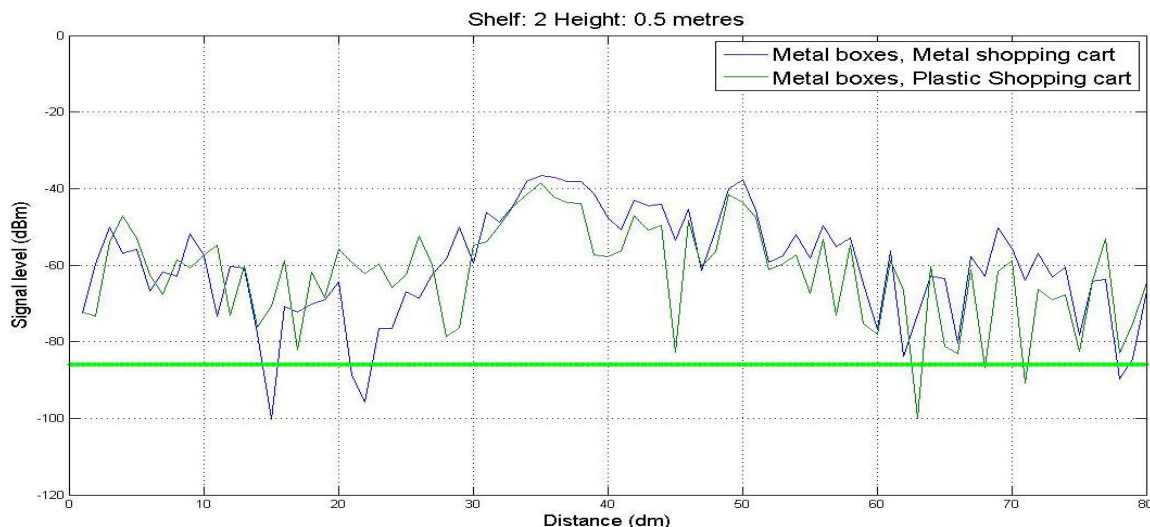
**Figura 3. 78. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 1 con cajas de metal utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde)**

En este caso en el que las estanterías están llenas de objetos de metal, observamos lo que ya anteriormente hemos podido comprobar, que el carro de plástico se comporta de una forma más uniforme que el carro de metal.

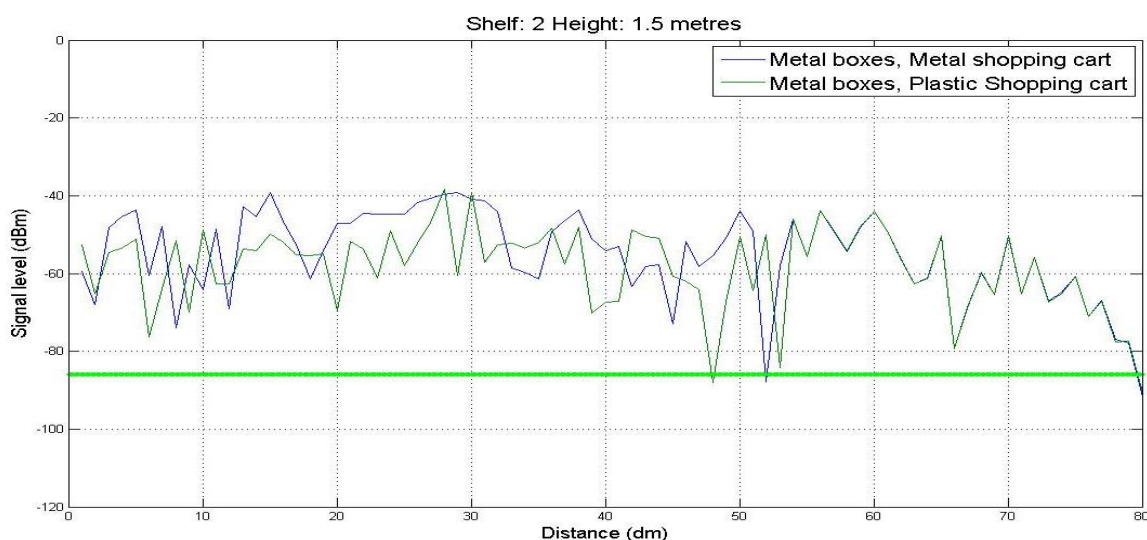
### 3.6.3.2. Estantería 2



La estantería 2, es la que se encuentra más cerca del carro, como se puede ver en la figura 3.68. Al igual que para la estantería 1 se han realizado dos radiales a las alturas de 0.5 y 1.5 metros.



**Figura 3. 79. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 2 con cajas de metal utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde)**



**Figura 3. 80. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 2 con cajas de metal utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde)**

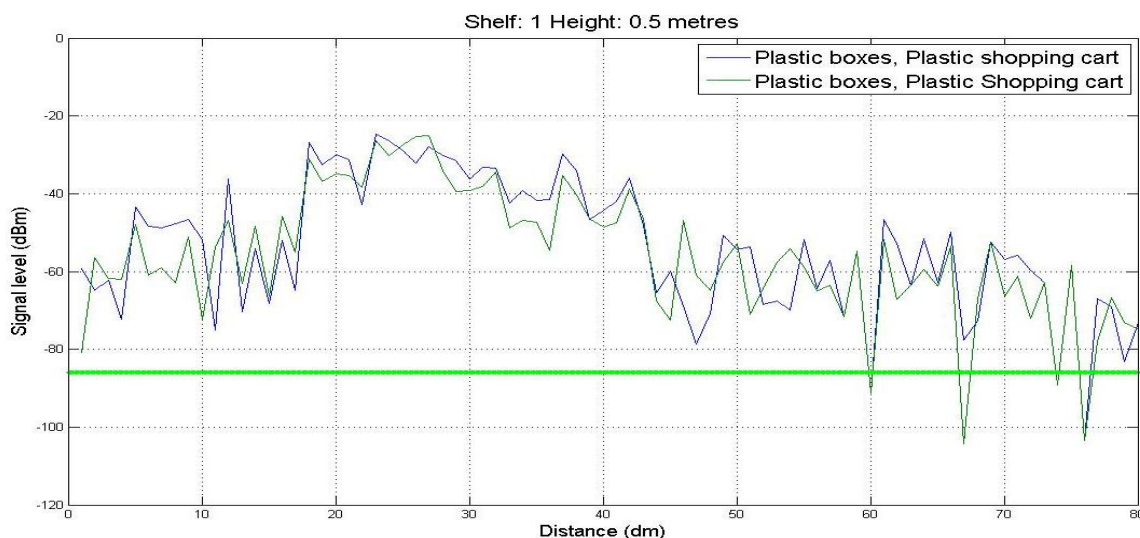
Para el caso de la estantería 2 observamos que el nivel de la señal usando un carro u otro es bastante similar, exceptuando algunos puntos concretos donde el nivel de señal difiere

### 3.6.4. Objetos de Plástico

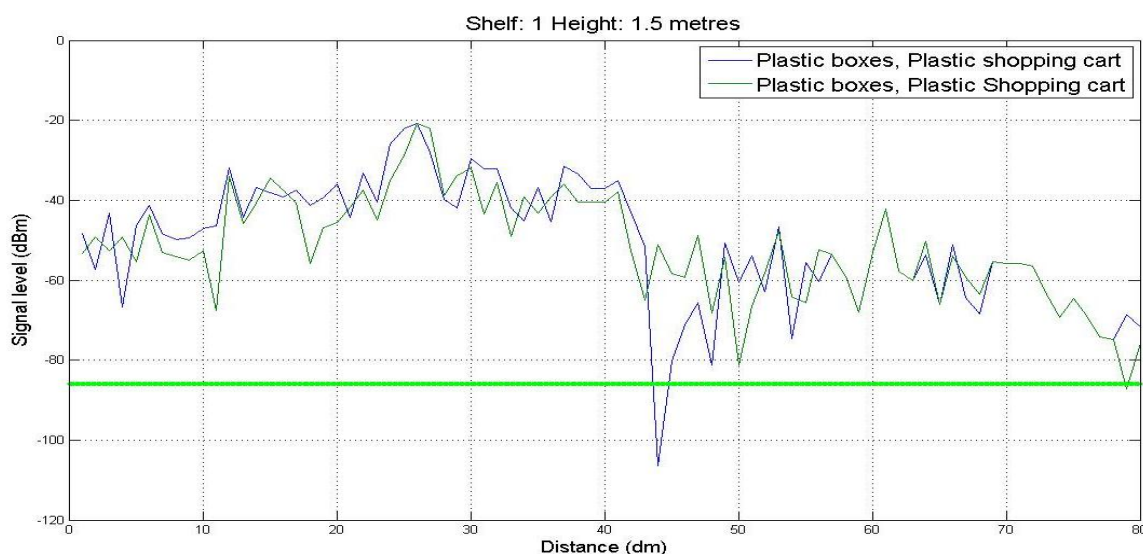
En este último caso vamos a analizar como afecta la presencia de objetos de plástico en las estanterías. Para ello vamos a representar un plano de nivel de potencia y dos radiales a diferente altura en cada estantería.

### 3.6.4.1. Estantería 1

La estantería 1, es la que se encuentra más alejada del carro, como se puede ver en la figura 3.69. Se ha trazado una radial a lo largo de ella a la altura de 0.5 y 1.5 metros de altura para ver detalladamente el nivel de señal en cada punto.



**Figura 3. 81.** Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 1 con cajas de plástico utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde)



**Figura 3. 82.** Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 1 con cajas de plástico utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde)

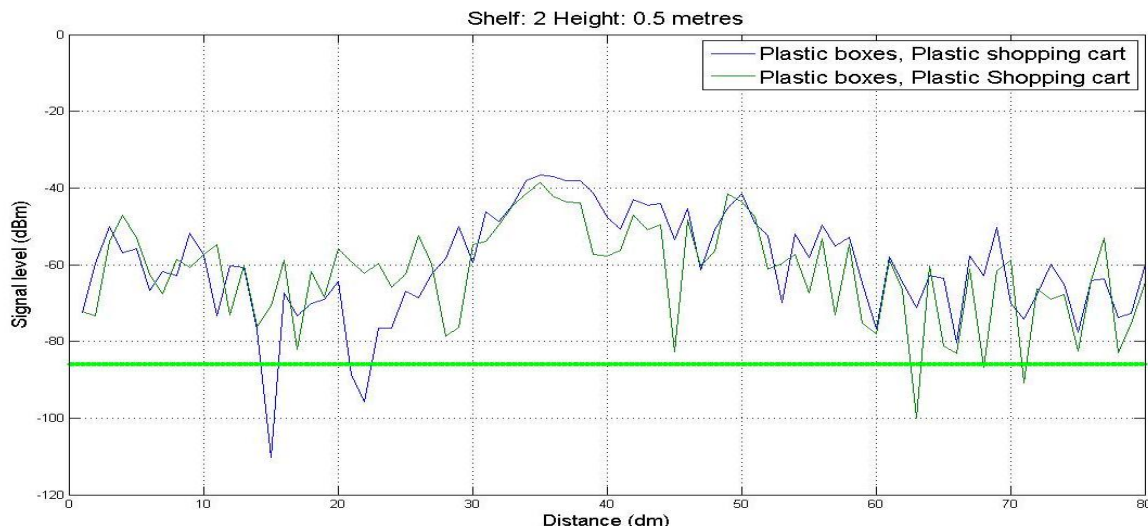
En las gráficas anteriores se observa que el nivel de señal varía bastante respecto al nivel que se tenía anteriormente utilizando un carro de metal.

Se puede apreciar por ejemplo que a la altura de 1.5 metros a unos 4.5 si se usa un carro de metal el nivel de señal experimenta una caída de nivel considerada, con el uso de carro de plástico este fenómeno no sucede.

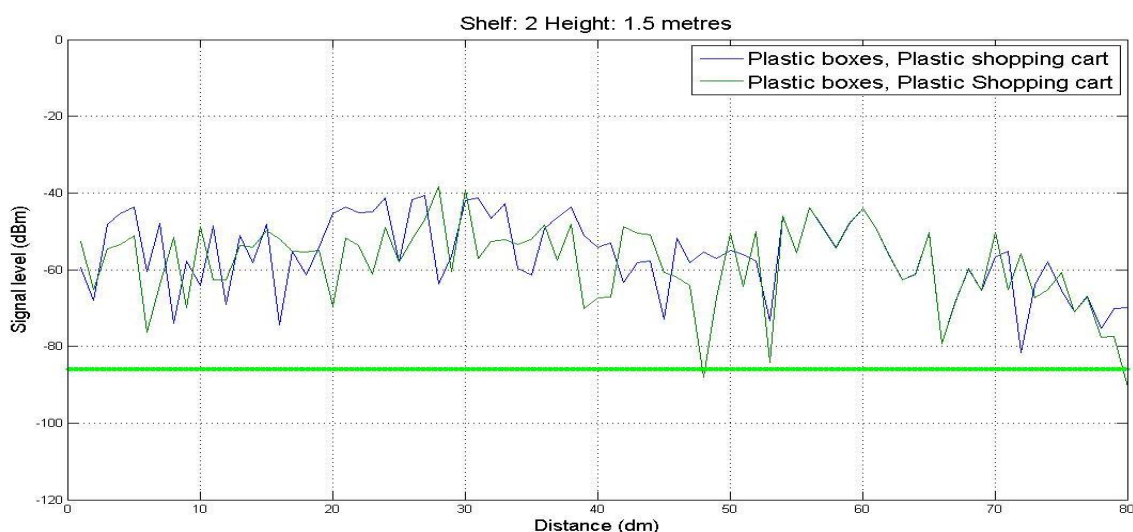


## 3.6.4.2. Estantería 2

La estantería 2, es la que se encuentra más cerca del carro, como se puede ver en la figura 3.69. Al igual que para la estantería 1 se han realizado dos radiales a las alturas de 0.5 y 1.5 metros.



**Figura 3. 83. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 2 con cajas de plástico utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde)**



**Figura 3. 84. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 2 con cajas de plástico utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde)**

Observamos que para el caso de la estantería 2 usando un carro de plástico podríamos evitar la caída de nivel que existe utilizando un carro de metal a la altura de 0.5 metros a una distancia de 1.5 metros.

## 4. Conclusiones

- Los modelos analíticos no son lo suficientemente exactos porque se basan solo en la distancia para calcular las pérdidas, por eso es más acertado usar modelos basados en trazado de rayos siempre que estos estén bien programados y tengan en cuenta el mayor número de variables posible.
- Los modelos analíticos no tienen en cuenta fenómenos importantes en la transmisión por radio como son la reflexión, refracción y difracción.
- Los sistemas RFID y ZigBee no permiten lecturas a largas distancias por lo que es inviable implementar un sistema centralizado, en el que un solo lector controle todos los productos de un supermercado.
- Cuando se implanta el sistema RFID a nivel de producto también hay que tener en cuenta la naturaleza de este o de su envase, ya que puede absorber la energía que llega a la etiqueta en lugar de reflejarla. Un ejemplo claro de esto es el caso de los líquidos mostrado en el estudio, en donde la etiqueta recibe menos potencia porque estos absorben las ondas electromagnéticas.
- Es importante hacer una elección correcta tanto de tag como de lector RFID basándose en la distancia de uso que requiere la actividad, no solo por el ahorro en recursos, también por seguridad.
- La implantación de estos sistemas proporciona a la compañía una visión global de todos los productos. Esto le puede reportar innumerables beneficios que no hacen sino mejorar la productividad de la empresa. Además supone un plus para el sistema de calidad de la empresa en estos tiempos de tanta exigencia en términos de calidad.
- Una gran parte de los beneficios que puede reportar estos sistemas, son de tipo estratégico, difíciles de cuantificar. Beneficios derivados de un mejor posicionamiento con respecto al resto de competidores, una mejor imagen de marca, una mayor imagen de calidad de producto...

## 5. Líneas futuras

- Sería interesante poder contrastar los resultados obtenidos mediante la simulación con resultados obtenidos con mediciones reales en un entorno comercial.
- Suponiendo que todos los productos estén identificados por una etiqueta de radio frecuencia, con un simple arco de lectura por radiofrecuencia se podría obtener toda la información de los productos que llevamos en el carro sin tener que depositar uno a uno los productos sobre una cinta.
- Analizar la aplicación de sistemas emergentes, como Bluetooth 4.0 o ZigBee, con el fin de posibilitar la interconexión tanto de carros con estanterías como de los carros entre sí.
- Sería conveniente analizar el efecto de interferencia en un entorno con múltiples sistemas en funcionamiento (por ejemplo, la interacción con sistemas WLAN/WPAN en el entorno).
- Considerar el efecto del movimiento del carro, así como la posible interacción con el usuario.

## 6. Bibliografía

- [1] José María Hernando Rábanos, Transmisión *por radio*, Editorial Universitaria Ramos Areces, 2008
- [2] Curt Levis, Joel T. Johnson, Fernando L. Teixeira, *Radiowave Propagation: Physics And Applications*, Editorial Jphn Wiley 2010
- [3] Jie Wei, Stephen C.H. Leung, S.C.Lee, Bee Kwok, *Simulation of RFID-enabled Loading Strategy for Outbound Logistic: A Case Study in Hong Kong*, Computer & Industrial Engineering, 2009
- [4] <http://www.eveliux.com/mx/tipos-de-propagacion.php>
- [5] <http://bieec.epn.edu.ec:8180/dspace/bitstream/123456789/946/5/T10709CAP1.pdf>
- [6] [http://www.visionlearning.com/library/module\\_viewer.php?mid=138&l=s](http://www.visionlearning.com/library/module_viewer.php?mid=138&l=s)
- [7] <http://grupo2radiobiologiayradioproteccion2.wordpress.com/2012/02/>
- [8] <http://www.luldma.com.ar/grupooeste/propaga/propaga1.htm>
- [9] [http://ca.wikipedia.org/wiki/Fitxer:Ley\\_de\\_Snell\\_%28es%29.svg](http://ca.wikipedia.org/wiki/Fitxer:Ley_de_Snell_%28es%29.svg)
- [10] <http://varinia.es/blog/2011/02/23/%C2%BFque-es-la-difraccion-de-la-luz/>
- [11] <http://eveliomartinez.com/mtic/temario/149.html?task=view>
- [12] <http://www.datuopinion.com/iff>
- [13] [http://www.dipolerfid.es/tecnologia\\_RFID/Frecuencias\\_RFID.aspx](http://www.dipolerfid.es/tecnologia_RFID/Frecuencias_RFID.aspx)
- [14] [http://en.wikipedia.org/wiki/File:ZigBee\\_protocol\\_stack.png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:ZigBee_protocol_stack.png)
- [15] [http://www.teleco.com.br/es/tutoriais/es\\_tutorialZigBee/pagina\\_3.asp](http://www.teleco.com.br/es/tutoriais/es_tutorialZigBee/pagina_3.asp)
- [16] <http://sx-de-tx.wikispaces.com/ZIGBEE>
- [17] <http://www.sensonet.com/>
- [18] [http://www.stg.com/wireless/ZigBee\\_netw.html](http://www.stg.com/wireless/ZigBee_netw.html)
- [19] [http://www.ee.washington.edu/faculty/nikitin\\_pavel/papers/Letters\\_2007.pdf](http://www.ee.washington.edu/faculty/nikitin_pavel/papers/Letters_2007.pdf)

# Índice de figuras

<i>Figura 1. 1. Ejemplo de aplicación de la tecnología RFID a un Supermercado</i>	9
<i>Figura 1. 2 Lenovo ThinkStation D20</i>	10
<i>Figura 1. 3. Acer travelmate 5720G</i>	11
<i>Figura 1. 4. Matlab 2009b</i>	12
<i>Figura 1. 5. SigmaPlot 11</i>	12
<i>Figura 2. 1. Onda electromagnética [6]</i>	13
<i>Figura 2. 2. Caracterización de una onda electromagnética [7]</i>	13
<i>Figura 2. 3. Polarización de una onda electromagnética [8]</i>	15
<i>Figura 2. 4. Ley de Fresnell [9]</i>	15
<i>Figura 2. 5. Reflexión dependiendo de la polarización de la onda electromagnética</i>	16
<i>Figura 2. 6. Difracción [10]</i>	17
<i>Figura 2. 7. Propagación ionosférica y por onda directa [11]</i>	17
<i>Figura 2. 8. Propagación superficial y troposférica [11]</i>	18
<i>Figura 2. 9. Propagación espacial [11]</i>	19
<i>Figura 2. 10. Sistema IFF [12]</i>	22
<i>Figura 2. 11. Código de barras unidireccional y bidireccional</i>	24
<i>Figura 2. 12. Sistema de reconocimiento por huella dactilar</i>	25
<i>Figura 2. 13. Tarjeta inteligente</i>	26
<i>Figura 2. 14. Esquema básico de un sistema RFID</i>	27
<i>Figura 2. 15. Tag RFID</i>	27
<i>Figura 2. 16. Sistema acústico-magnético</i>	30
<i>Figura 2. 17. Tag de acoplamiento electromagnético de retrodispersión</i>	32
<i>Figura 2. 18. Tag de acoplamiento inductivo</i>	34
<i>Figura 2. 19. Estructura de un tag SAW</i>	35
<i>Figura 2. 20. Lectores o Interrogadores RFID</i>	35
<i>Figura 2. 21. Antena ortogonal</i>	37
<i>Figura 2. 22. Antena polarizada circularmente</i>	38
<i>Figura 2. 23. Antena linealmente polarizada</i>	38
<i>Figura 2. 24. Antena omnidireccional</i>	38
<i>Figura 2. 25. Frecuencias que utiliza el sistema RFID [13]</i>	40
<i>Figura 2. 26. Pila de protocolos ZigBee [14]</i>	42
<i>Figura 2. 27. Capas que componen el sistema ZigBee [15]</i>	44
<i>Figura 2. 28. Campos de los cuatro tipos de paquetes básicos de ZigBee. [16]</i>	46
<i>Figura 2. 29. Diferentes topologías de red disponibles en ZigBee. [17]</i>	48
<i>Figura 2. 30. Topología en estrella [18]</i>	48
<i>Figura 2. 31. Topología en árbol [18]</i>	50
<i>Figura 2. 32. Topología Peer to Peer [18]</i>	51
<i>Figura 2. 33. Topología en Malla [18]</i>	52
<i>Figura 3. 1. Valores típicos de ganancia de etiqueta para distintos materiales</i>	54
<i>Figura 3. 2. Sistema RFID pasivo y circuito equivalente de la etiqueta [19]</i>	54
<i>Figura 3. 3. Cálculo analítico de la pérdida de propagación en función de la distancia y del coeficiente de reflexión</i>	55
<i>Figura 3. 4. Calculo analítico de las perdidas de propagación para etiquetas de materiales diferentes y para una determinada altura</i>	57
<i>Figura 3. 5. Nivel de señal en una estantería a 20 cm del suelo</i>	57
<i>Figura 3. 6. Nivel de señal en una estantería a 70 cm del suelo</i>	58
<i>Figura 3. 7. Nivel de señal en una estantería a 120 cm del suelo</i>	58
<i>Figura 3. 8. Nivel de señal en una estantería a 170 cm del suelo</i>	59
<i>Figura 3. 9. Nivel de señal para el sistema ZigBee para <math>n1 = 2</math></i>	60
<i>Figura 3. 10. Nivel de señal para el sistema ZigBee para <math>n1 = 5</math></i>	60
<i>Figura 3. 11. Nivel de señal para el sistema ZigBee para <math>n1 = 8</math></i>	61
<i>Figura 3. 12. Escenario en 3D</i>	63
<i>Figura 3. 13. Escenario (planta)</i>	63
<i>Figura 3. 14. Perfil de retardo potencia</i>	65
<i>Figura 3. 15. Posición antena en el centro del carro</i>	65

<i>Figura 3. 16. Planta del escenario con la antena en el centro del carro</i> .....	66
<i>Figura 3. 17. Nivel de señal a 0.5 metros de altura</i> .....	66
<i>Figura 3. 18. Nivel de señal a 1 metro de altura</i> .....	67
<i>Figura 3. 19. Nivel de señal a 1.5 metros de altura</i> .....	67
<i>Figura 3. 20. Nivel de señal a 2 metros de altura</i> .....	68
<i>Figura 3. 21. Nivel de señal a 0.5 metros de altura</i> .....	68
<i>Figura 3. 22. Nivel de señal a 1 metro de altura</i> .....	69
<i>Figura 3. 23. Nivel de señal a 1.5 metros de altura</i> .....	69
<i>Figura 3. 24. Nivel de señal a 2 metros de altura</i> .....	70
<i>Figura 3. 25. Posición antena en la esquina del carro</i> .....	70
<i>Figura 3. 26. Planta del escenario con la antena en la esquina del carro</i> .....	71
<i>Figura 3. 27. Nivel de señal a 0.5 metros de altura</i> .....	71
<i>Figura 3. 28. Nivel de señal a 1 metro de altura</i> .....	72
<i>Figura 3. 29. Nivel de señal a 1.5 metros de altura</i> .....	72
<i>Figura 3. 30. Nivel de señal a 2 metros de altura</i> .....	73
<i>Figura 3. 31. Nivel de señal a 0.5 metros de altura</i> .....	73
<i>Figura 3. 32. Nivel de señal a 1 metro de altura</i> .....	74
<i>Figura 3. 33. Nivel de señal a 1.5 metros de altura</i> .....	74
<i>Figura 3. 34. Nivel de señal a 2 metros de altura</i> .....	75
<i>Figura 3. 35. Localización de las radiales en el escenario</i> .....	76
<i>Figura 3. 36. Comparativa a 0.5 metros en la estantería 1 entre la posición de la antena en el centro y en la esquina</i> .....	76
<i>Figura 3. 37. Comparativa a 1 metro en la estantería 1 entre la posición de la antena en el centro y en la esquina</i> .....	77
<i>Figura 3. 38. Comparativa a 1.5 metros en la estantería 1 entre la posición de la antena en el centro y en la esquina</i> .....	77
<i>Figura 3. 39. Comparativa a 2 metros en la estantería 1 entre la posición de la antena en el centro y en la esquina</i> .....	78
<i>Figura 3. 40. Simulación en un escenario grande a 1.5 metros de altura</i> .....	79
<i>Figura 3. 41. Esquema de las radiales para el estudio de una posible comunicación entre las estanterías y el carro</i> .....	79
<i>Figura 3. 42. Nivel de señal a 0.5 metros para diferentes materiales de etiqueta (Radial 1 RFID)</i> .....	80
<i>Figura 3. 43. Nivel de señal a 1.5 metros para diferentes materiales de etiqueta (Radial 1 RFID)</i> .....	80
<i>Figura 3. 44. Nivel de señal a 0.5 metros para diferentes materiales de etiqueta (Radial 2 RFID)</i> .....	81
<i>Figura 3. 45. Nivel de señal a 1.5 metros para diferentes materiales de etiqueta (Radial 2 RFID)</i> .....	81
<i>Figura 3. 46. Vista en 3D del escenario</i> .....	82
<i>Figura 3. 47. Planta del escenario</i> .....	82
<i>Figura 3. 48. Ubicación de las Radiales</i> .....	83
<i>Figura 3. 49. Nivel de señal a 1 metro de altura con objetos de cartón en las estanterías</i> .....	84
<i>Figura 3. 50. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cartón (verde)</i> .....	85
<i>Figura 3. 51. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cartón (verde)</i> .....	85
<i>Figura 3. 52. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 2 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cartón (verde)</i> .....	86
<i>Figura 3. 53. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 2 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cartón (verde)</i> .....	86
<i>Figura 3. 54. Nivel de señal a 0.5 metros de altura con objetos de cristal en las estanterías</i> .....	87
<i>Figura 3. 55. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cristal (verde)</i> .....	87
<i>Figura 3. 56. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cristal (verde)</i> .....	88
<i>Figura 3. 57. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 2 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cristal (verde)</i> .....	88
<i>Figura 3. 58. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 2 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cristal (verde)</i> .....	89
<i>Figura 3. 59. Nivel de señal a 0.5 metros de altura con objetos de metal en las estanterías</i> .....	89
<i>Figura 3. 60. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de metal (verde)</i> .....	90



Figura 3. 61. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de metal (verde).....	90
Figura 3. 62. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 2 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de metal (verde).....	91
Figura 3. 63. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 2 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de metal (verde).....	91
Figura 3. 64. Nivel de señal a 0.5 metros de altura con objetos de cristal en las estanterías .....	92
Figura 3. 65. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de plástico (verde).....	92
Figura 3. 66. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de plástico (verde).....	93
Figura 3. 67. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 2 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de plástico (verde).....	93
Figura 3. 68. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 2 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de plástico (verde).....	94
Figura 3. 69. Ubicación de las radiales .....	95
Figura 3. 70. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 1 con cajas de cartón utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde) .....	95
Figura 3. 71. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 2 con cajas de cartón utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde) .....	96
Figura 3. 72. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 2 con cajas de cartón utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde) .....	97
Figura 3. 73. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 1 con cajas de cristal utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde) .....	98
Figura 3. 74. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 1 con cajas de cristal utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde) .....	98
Figura 3. 75. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 2 con cajas de cristal utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde) .....	99
Figura 3. 76. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 2 con cajas de cristal utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde) .....	99
Figura 3. 77. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 1 con cajas de metal utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde) .....	100
Figura 3. 78. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 1 con cajas de metal utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde) .....	100
Figura 3. 79. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 2 con cajas de metal utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde) .....	101
Figura 3. 80. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 2 con cajas de metal utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde) .....	101
Figura 3. 81. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 1 con cajas de plástico utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde) .....	102
Figura 3. 82. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 1 con cajas de plástico utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde) .....	102
Figura 3. 83. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 2 con cajas de plástico utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde) .....	103
Figura 3. 84. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 2 con cajas de plástico utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde) .....	103
A.1 1. Posición antena 1 .....	113
A.1 2. Posición del carro en el centro .....	113
A.1 3 Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (RFID) .....	114
A.1 4. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (ZigBee).....	115
A.1 5. Posición del carro cerca de la estantería 1 .....	115
A.1 6. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (RFID) .....	116
A.1 7. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (ZigBee).....	117
A.1 8. Posición del carro cerca de la estantería 2 .....	117
A.1 9. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (RFID) .....	118
A.1 10. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (ZigBee).....	119
A.1 11. Posición antena 2.....	119
A.1 12. Posición del carro en el centro .....	120
A.1 13. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (RFID) .....	120



A.1 14 Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (ZigBee).....	121
A.1 15 Posición del carro cerca de la estantería 1.....	121
A.1 16. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (RFID).....	122
A.1 17. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (ZigBee).....	123
A.1 18. Posición del carro cerca de la estantería 2.....	123
A.1 19. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (RFID).....	124
A.1 20. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (RFID).....	125
A.1 21. Posición antena 3.....	125
A.1 22. Posición del carro en el centro.....	126
A.1 23. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (RFID).....	126
A.1 24. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (ZigBee).....	127
A.1 25. A.1 27. Posición del carro cerca de la estantería 1.....	127
A.1 26. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (RFID).....	128
A.1 27. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (ZigBee).....	129
A.1 28. Posición del carro cerca de la estantería 2.....	129
A.1 29. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (RFID).....	130
A.1 30. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (ZigBee).....	131
A.1 31. Posición antena 4.....	132
A.1 32. Posición del carro en el centro.....	132
A.1 33. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (RFID).....	133
A.1 34. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (ZigBee).....	134
A.1 35. Posición del carro cerca de la estantería 1.....	134
A.1 36. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (RFID).....	135
A.1 37. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (ZigBee).....	136
A.1 38. Posición del carro cerca de la estantería 2.....	136
A.1 39. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (RFID).....	137
A.1 40. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (ZigBee).....	138
A.1 41. Localización de las radiales en el escenario.....	138
A.1 42. Nivel de potencia en la estantería 2 a 0.5 metros de altura.....	139
A.1 43. Nivel de potencia en la estantería 2 a 1 metro de altura.....	139
A.1 44. Nivel de potencia en la estantería 2 a 1.5 metros de altura.....	139
A.1 45. Nivel de potencia en la estantería 2 a 2 metros de altura.....	140
A.1 46. Nivel de potencia en la estantería 2 a 0.5 metros de altura.....	140
A.1 47. Nivel de potencia en la estantería 2 a 1 metro de altura.....	140
A.1 48. Nivel de potencia en la estantería 2 a 1.5 metros de altura.....	141
A.1 49. Nivel de potencia en la estantería 2 a 2 metros de altura.....	141
A.2. 1. Escenario con tres estanterías.....	143
A.2. 2. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (RFID).....	144
A.2. 3. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (ZigBee).....	145
A.2. 4. Nivel de potencia a 1 metro de altura para (RFID).....	146
A.2. 5. Nivel de potencia a 1 metro de altura para (ZigBee).....	147
A.2. 6. Nivel de potencia a 1 metro de altura para (RFID).....	148
A.2. 7. Nivel de potencia a 1 metro de altura para (ZigBee).....	149
A.2. 8. Nivel de potencia a 1 metro de altura para (RFID).....	150
A.2. 9. Nivel de potencia a 1 metro de altura para (ZigBee).....	151
A.2. 10. Nivel de potencia a 1 metro de altura para (RFID).....	152
A.2. 11. Nivel de potencia a 1 metro de altura para (ZigBee).....	153
A.3. 1. Ubicación de las Radiales.....	155
A.3. 2. Nivel de señal a 0.5 metros e n la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cartón (verde).....	156
A.3. 3. Nivel de señal a 1.5 metros e n la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cartón (verde).....	156
A.3. 4. Nivel de señal a 0.5 metros e n la estantería 2 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cartón (verde).....	157
A.3. 5. Nivel de señal a 1.5 metros e n la estantería 2 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cartón (verde).....	157
A.3. 6. Nivel de señal a 0.5 metros e n la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cristal (verde).....	158

A.3. 7. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cristal (verde).....	158
A.3. 8. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 2 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cristal (verde).....	159
A.3. 9. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 2 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cristal (verde).....	159
A.3. 10. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de metal (verde).....	160
A.3. 11. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de metal (verde).....	160
A.3. 12. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 2 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de metal (verde).....	161
A.3. 13. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de metal (verde).....	161
A.3. 14. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 1 con cajas de plástico utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde).....	162
A.3. 15. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 1 con cajas de plástico utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde).....	162
A.3. 16. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 2 con cajas de plástico utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde).....	163
A.3. 17. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 1 con cajas de plástico utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde).....	163

---

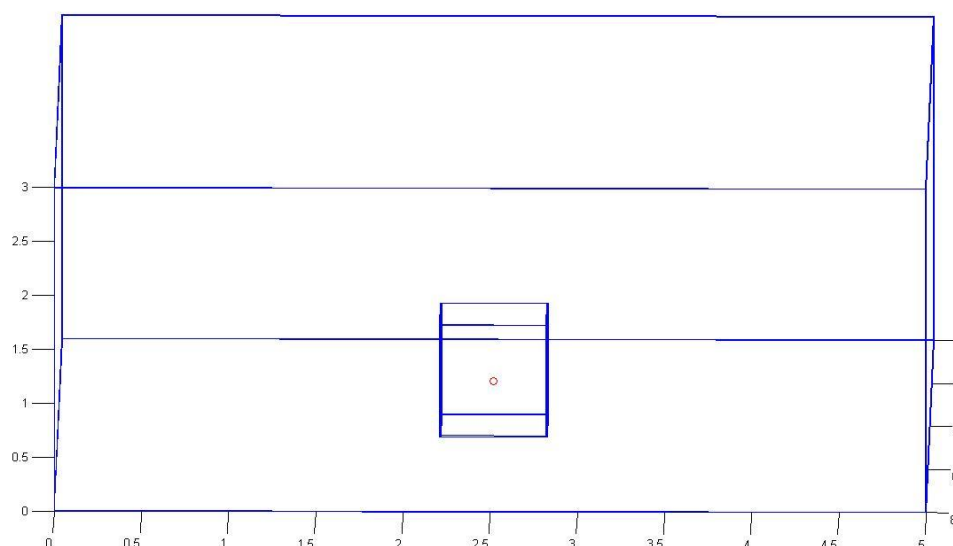
# ANEXO 1

## Posiciones de antena

En este Anexo se van a poner todos los resultados de las simulaciones, realizados para obtener la mejor posición de antena.

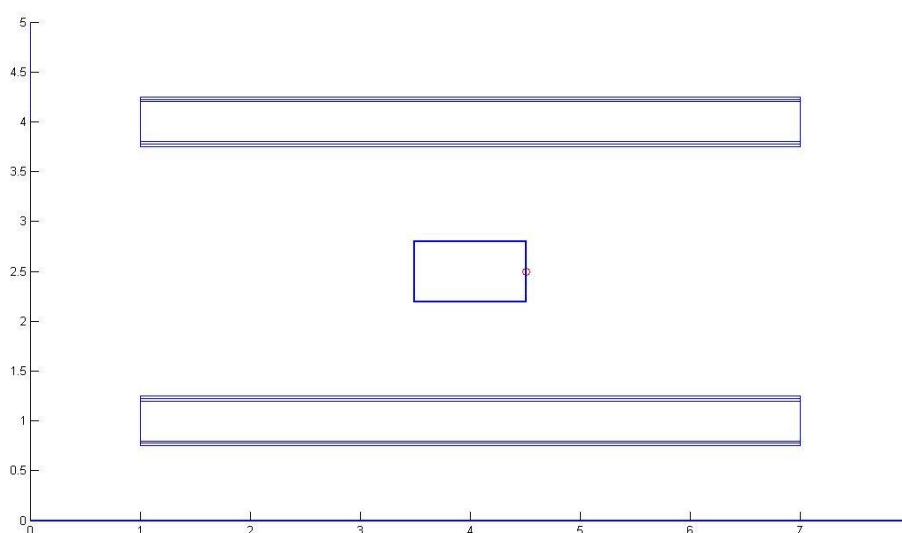
Se han tomado 4 posiciones de antena diferentes, que se probaran con tres posiciones de carro distintas, tanto para RFID como para ZigBee

## A.1.1 Posición 1



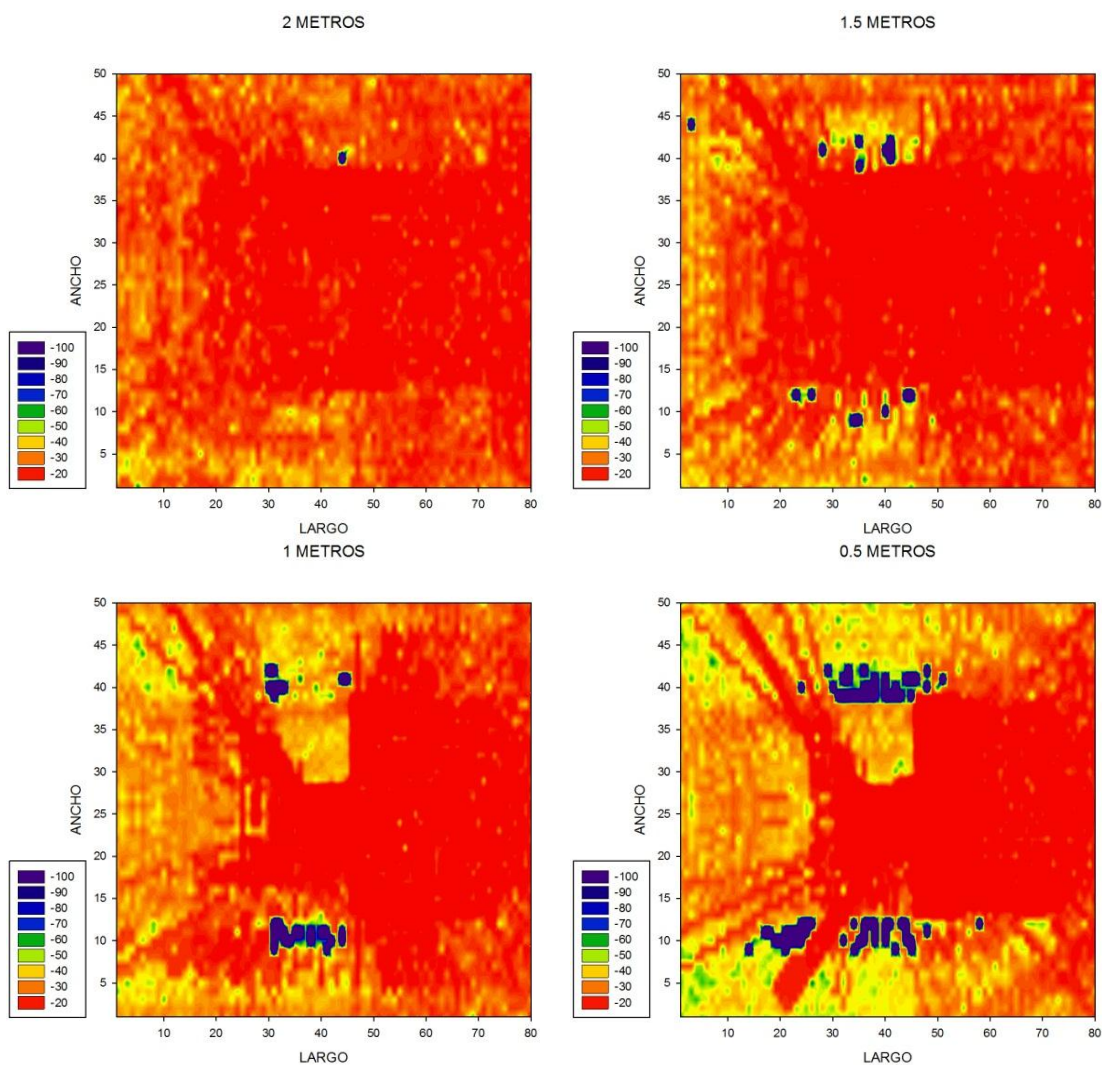
A.1 1. Posición antena 1

### A.1.1.1. Posición carro centro



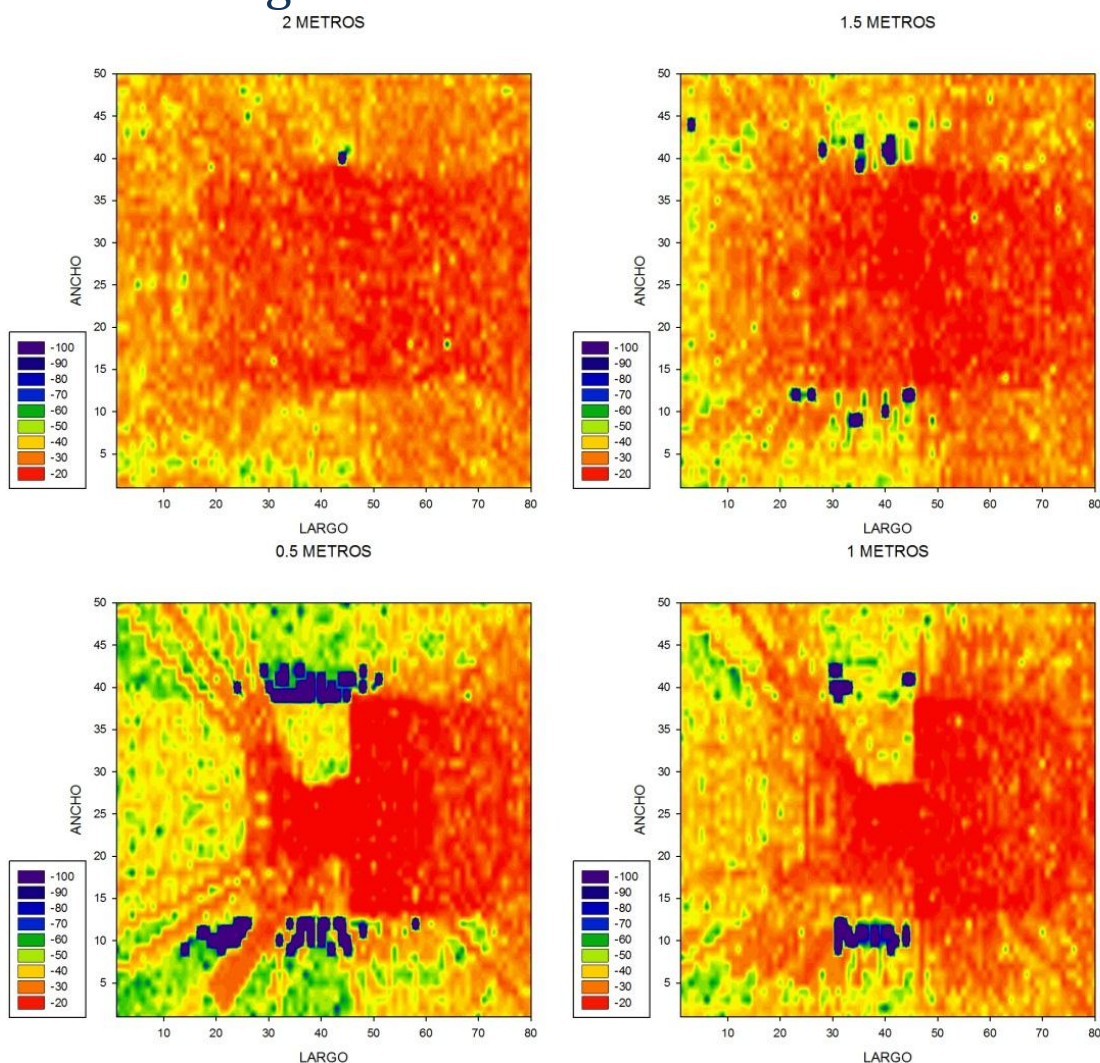
A.1 2. Posición del carro en el centro

## A.1.1.1.1. RFID



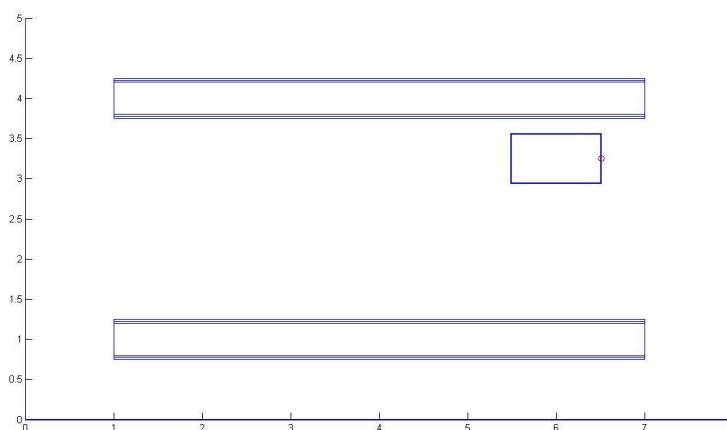
A.1 3 Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (RFID)

## A.1.1.1.2. ZigBee



A.1 4. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (ZigBee)

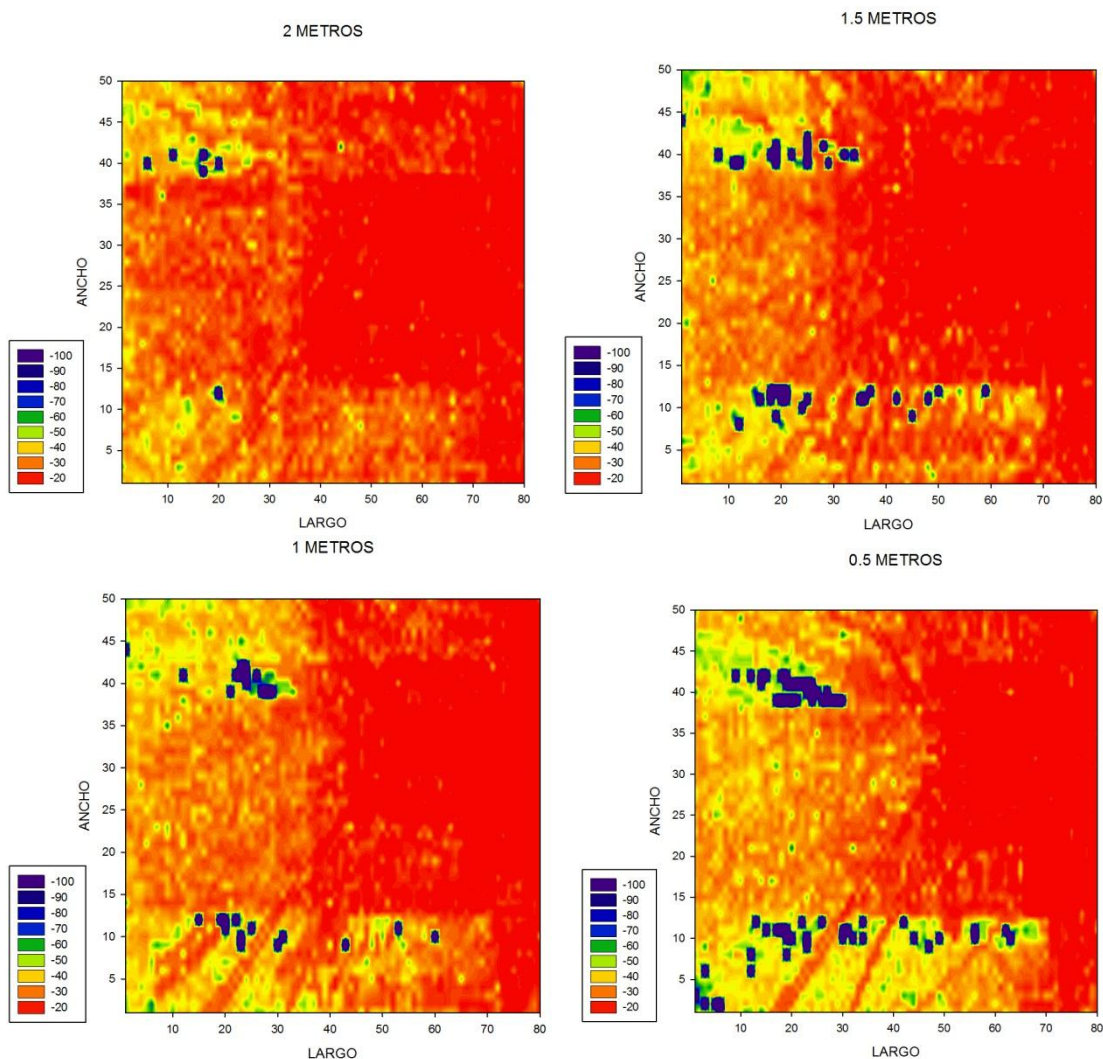
## A.1.1.2. Posición carro estantería 1



A.1 5. Posición del carro cerca de la estantería 1



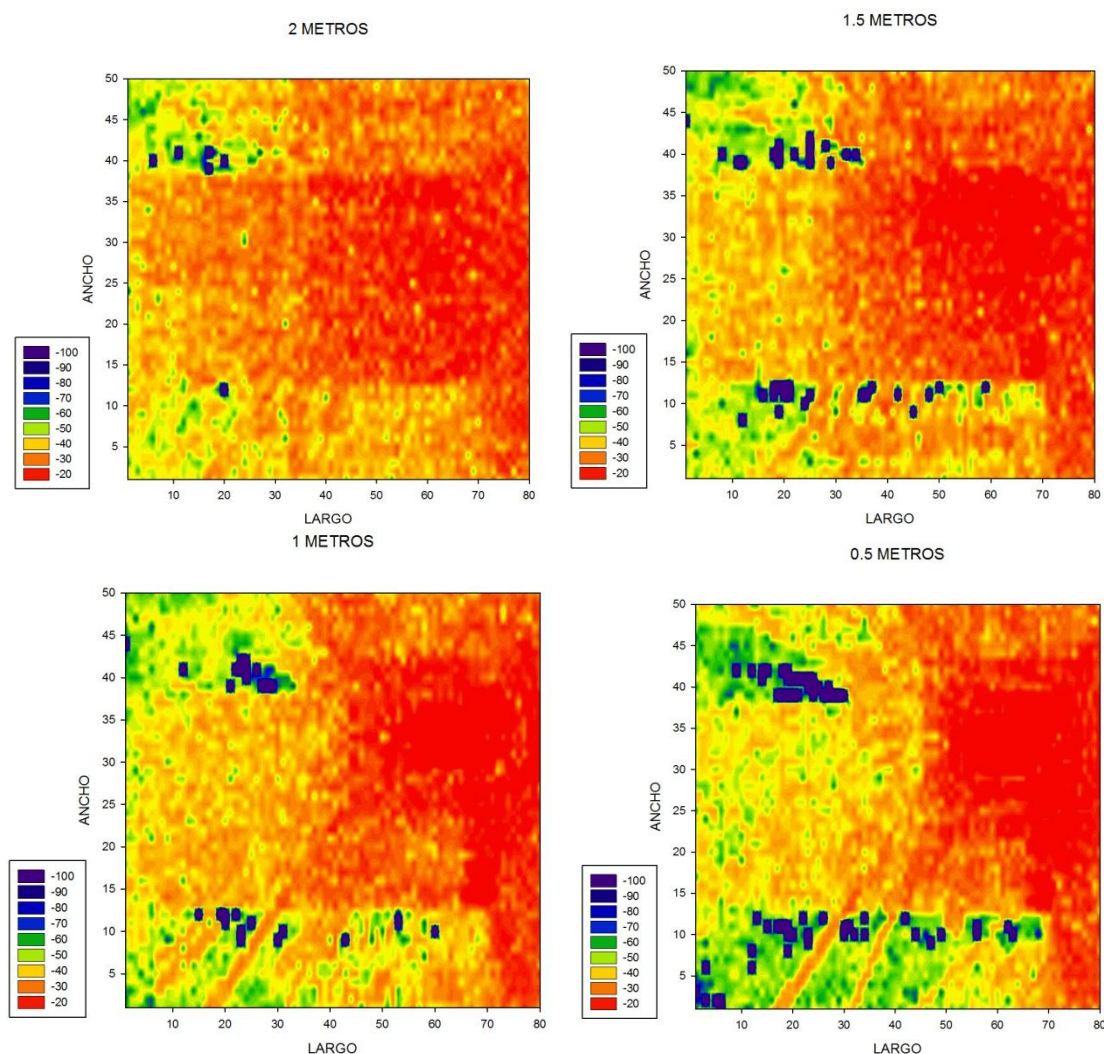
## A.1.1.2.1. RFID



A.1 6.Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (RFID)

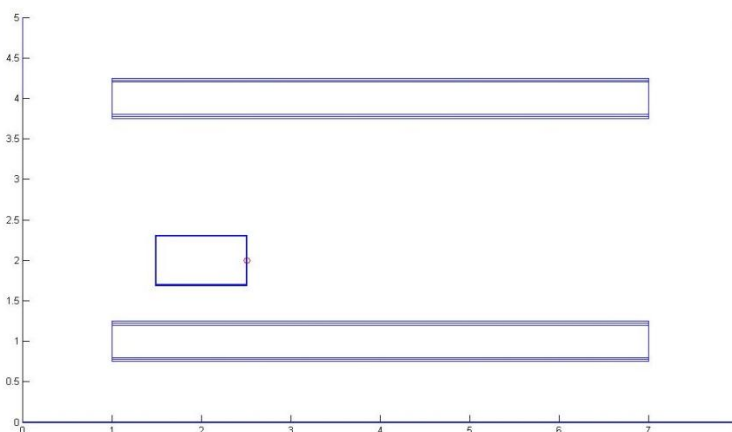


## A.1.1.2.2. ZigBee



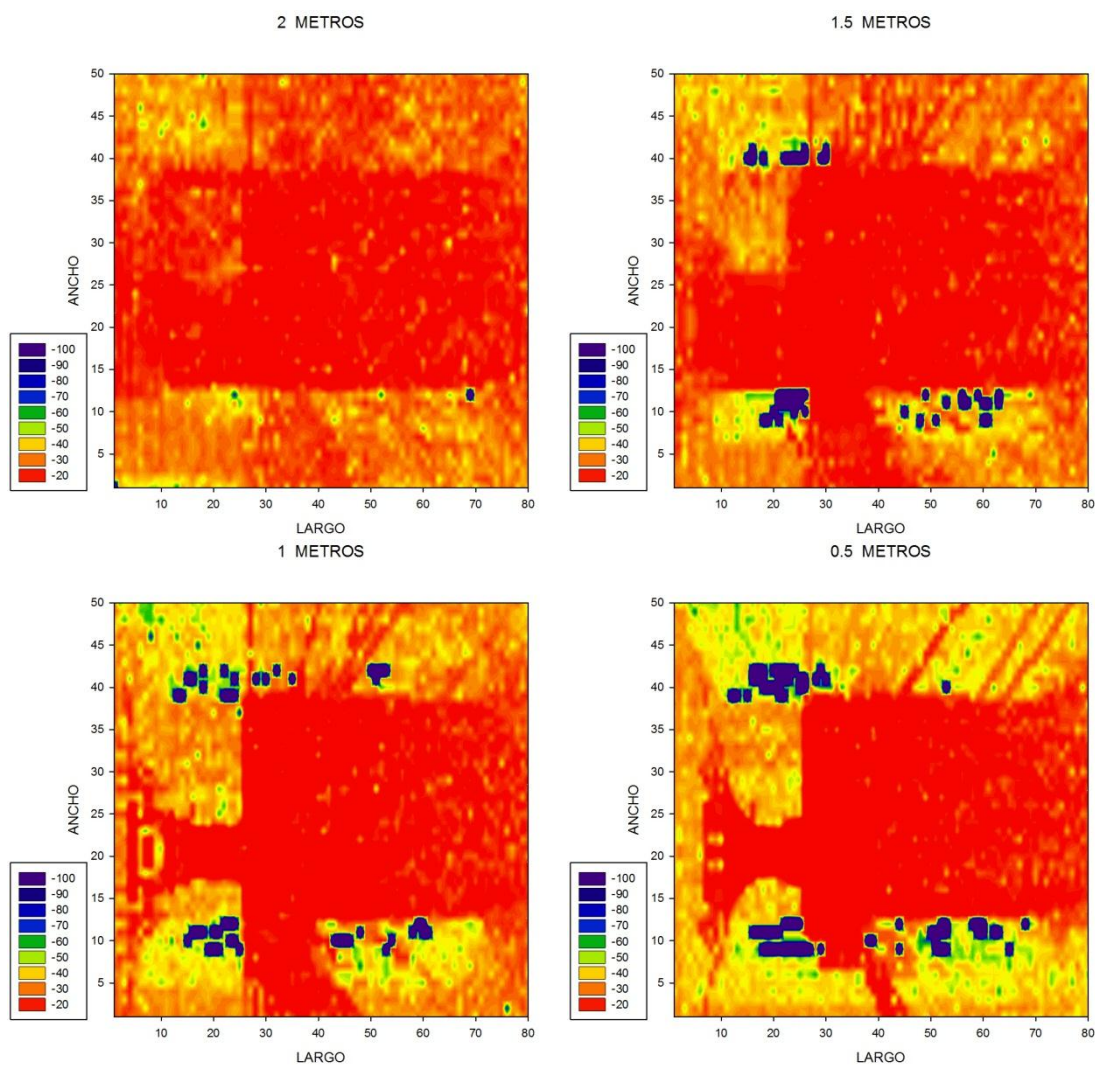
A.1 7. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (ZigBee)

## A.1.1.3. Posición carro estantería 2



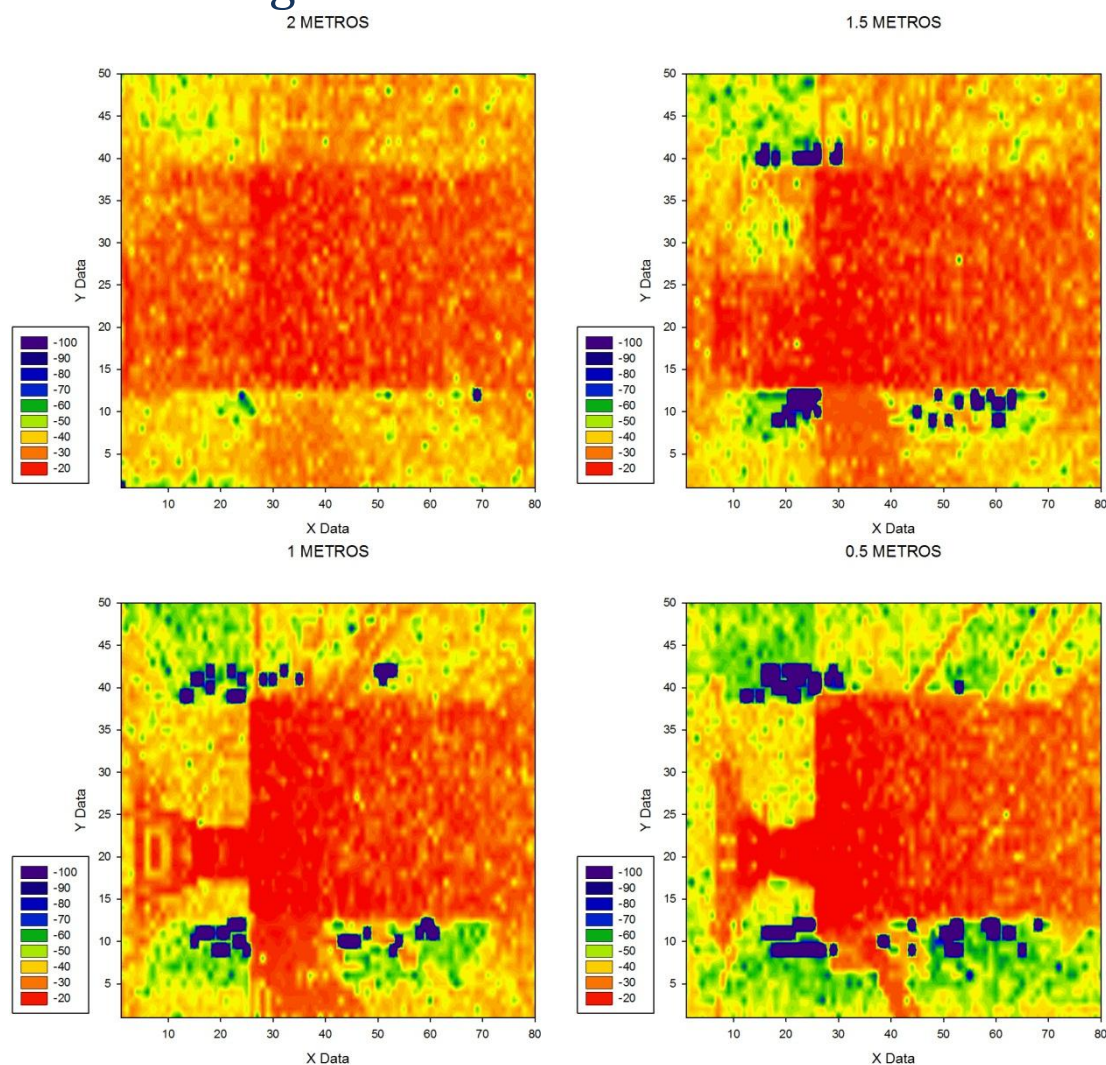
A.1 8. Posición del carro cerca de la estantería 2

## A.1.1.3.1. RFID



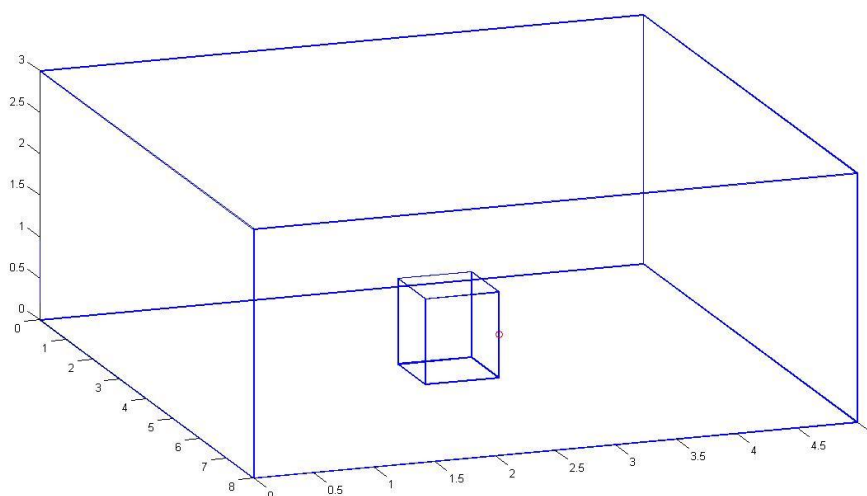
A.1 9.Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (RFID)

## A.1.1.3.2. ZigBee



A.1 10. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (ZigBee)

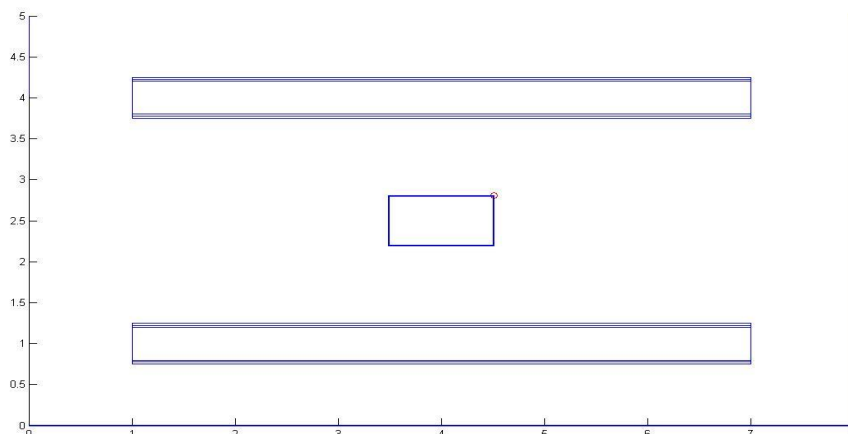
## A.1.2. Posición 2



A.1 11. Posición antena 2

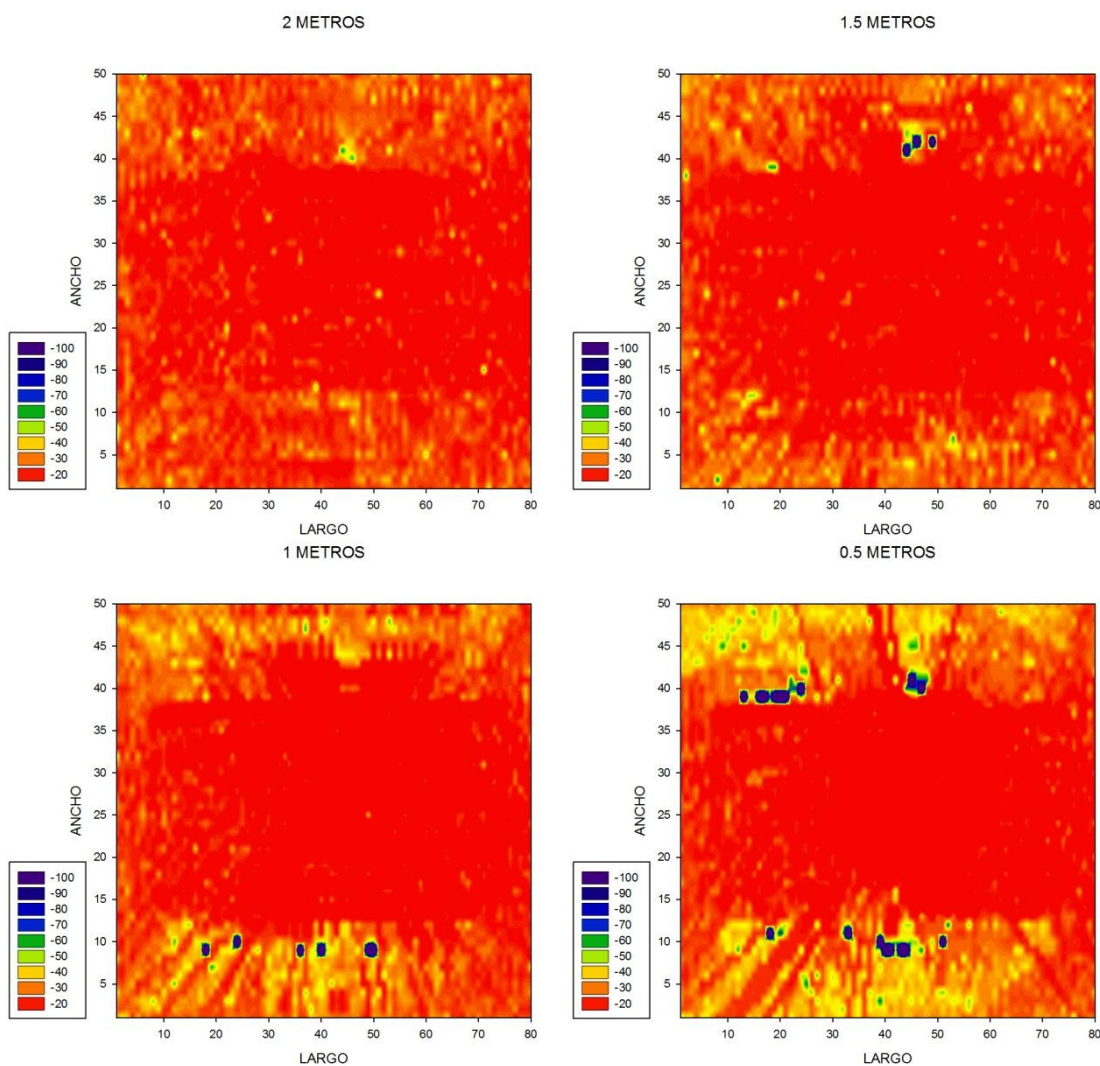


## A.1.2.1. Posición carro centro



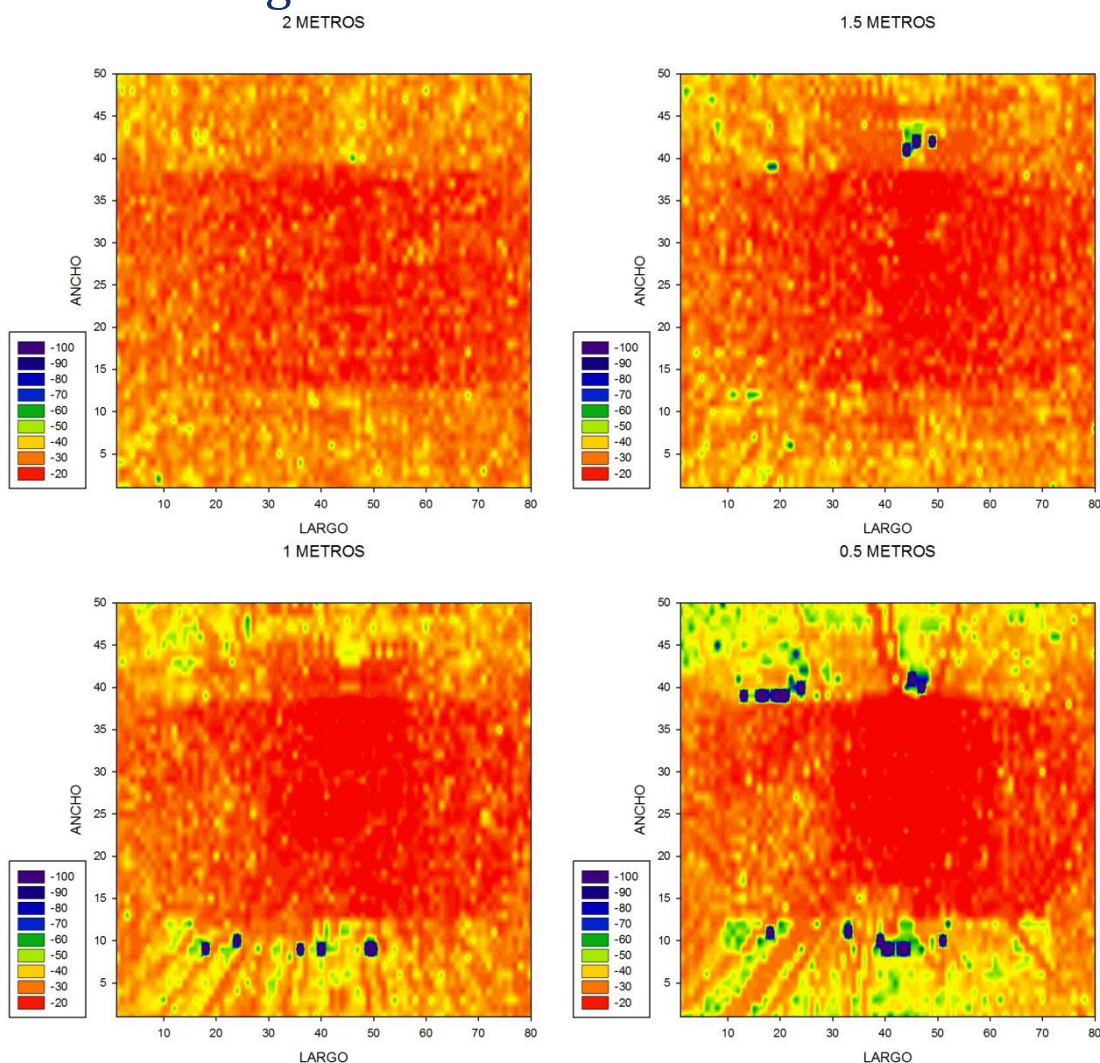
A.1 12. Posición del carro en el centro

### A.1.2.1.1 RFID



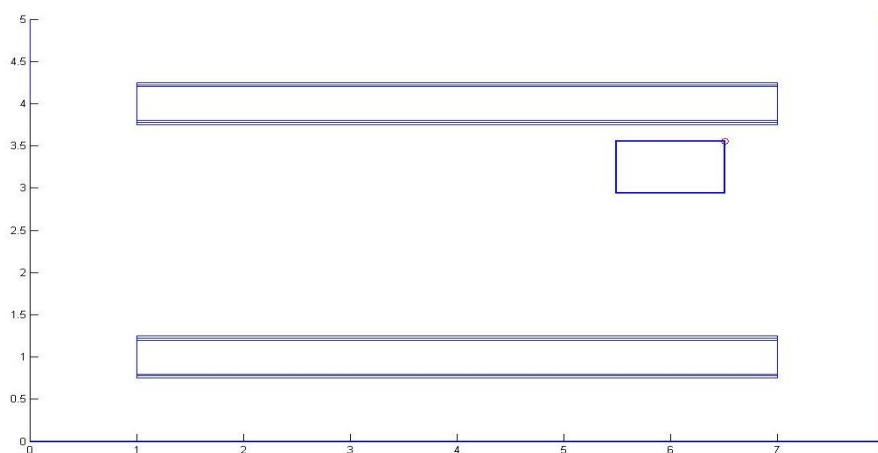
A.1 13. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (RFID)

## A.1.2.1.2. ZigBee



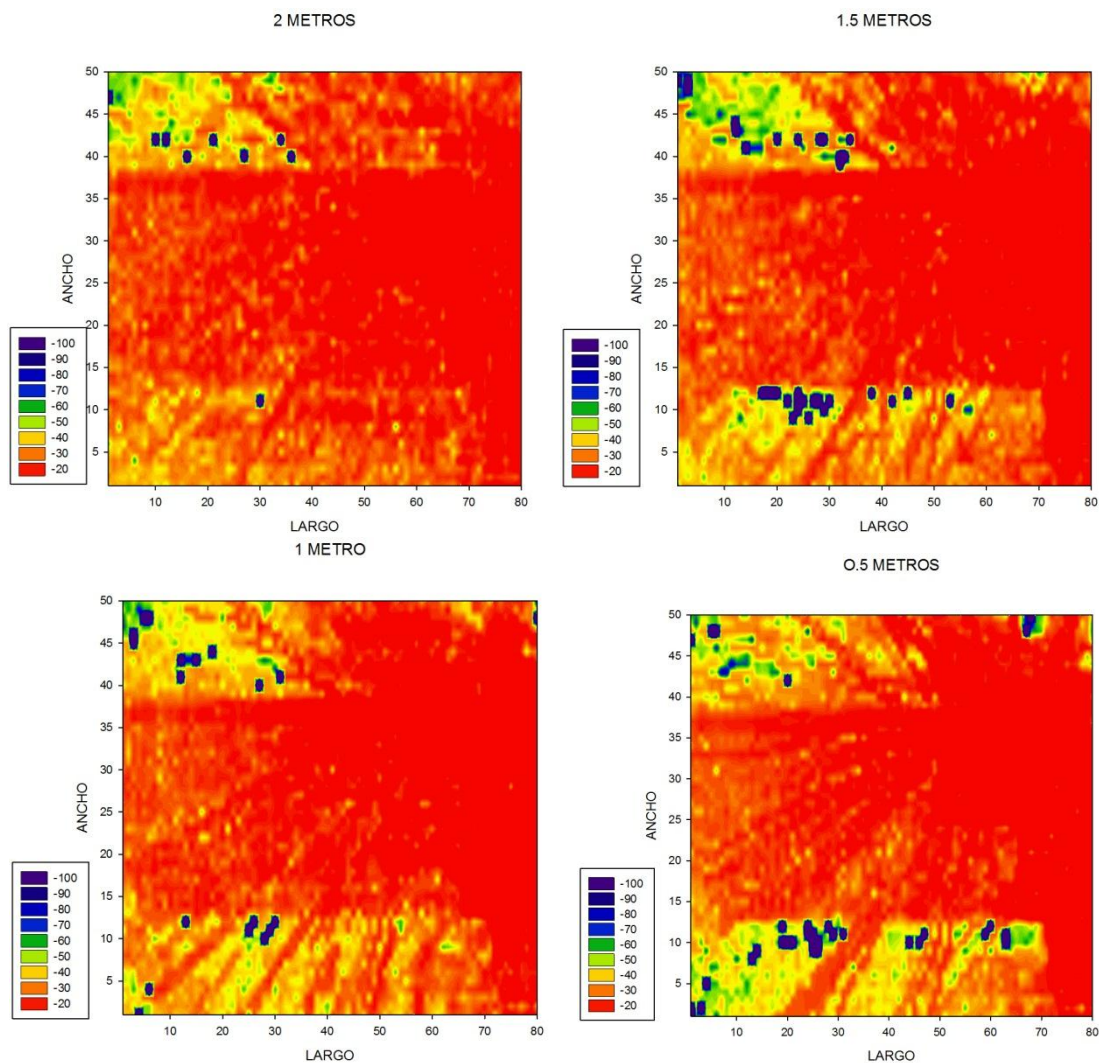
A.1 14 Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (ZigBee).

## A.1.2.2. Posición carro estantería 1



A.1 15 Posición del carro cerca de la estantería 1.

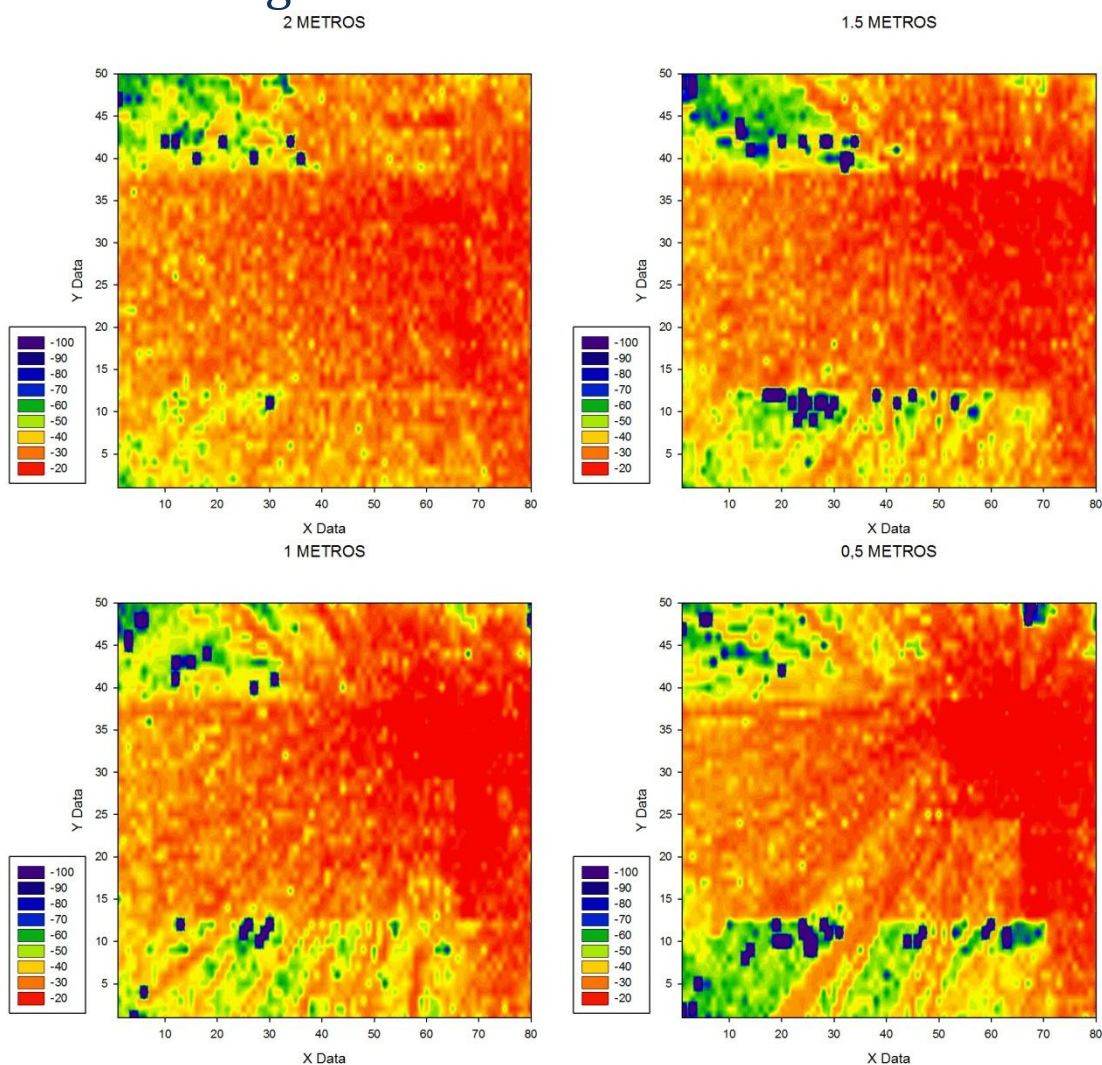
## A.1.2.2.1. RFID



A.1 16. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (RFID).

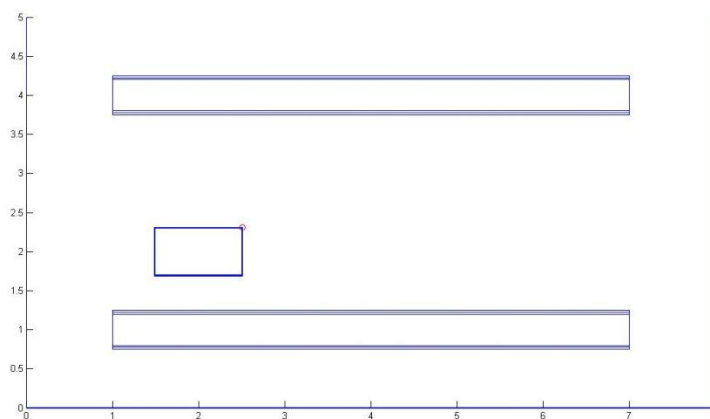


## A.1.2.2.2. ZigBee



A.1 17. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (ZigBee)

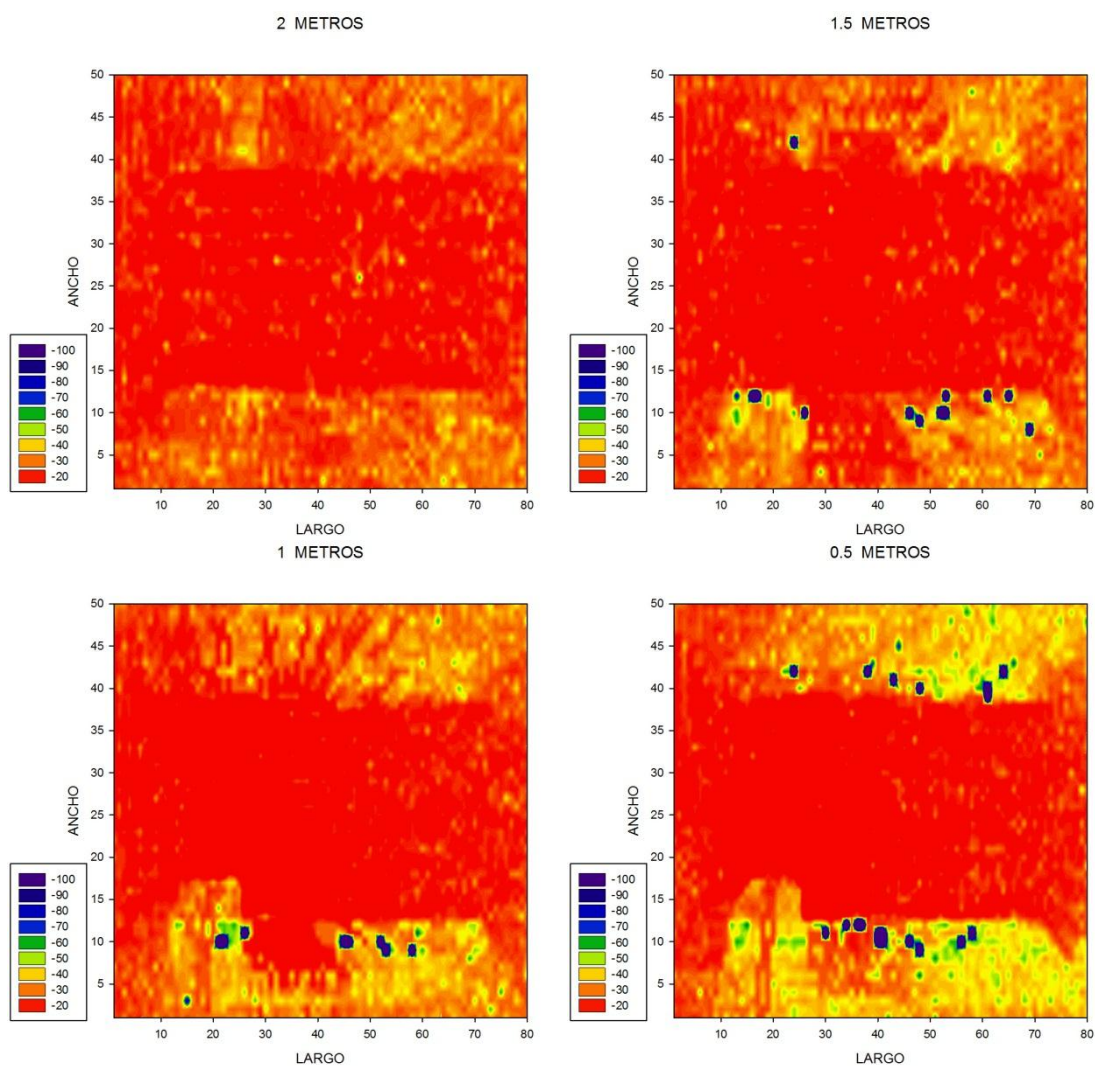
## A.1.2.3. Posición carro estantería 2



A.1 18. Posición del carro cerca de la estantería 2

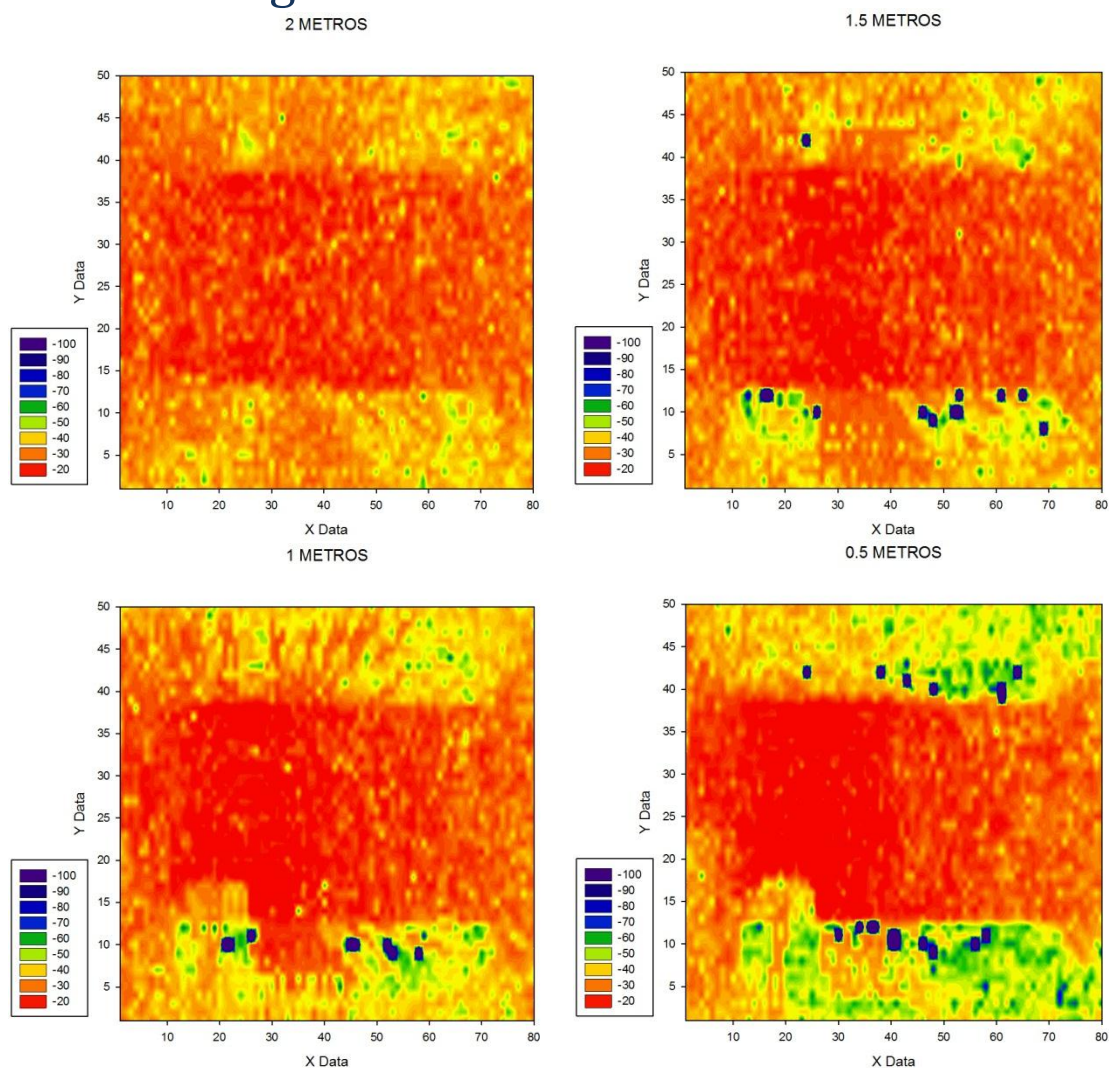


## A.1.2.3.1. RFID



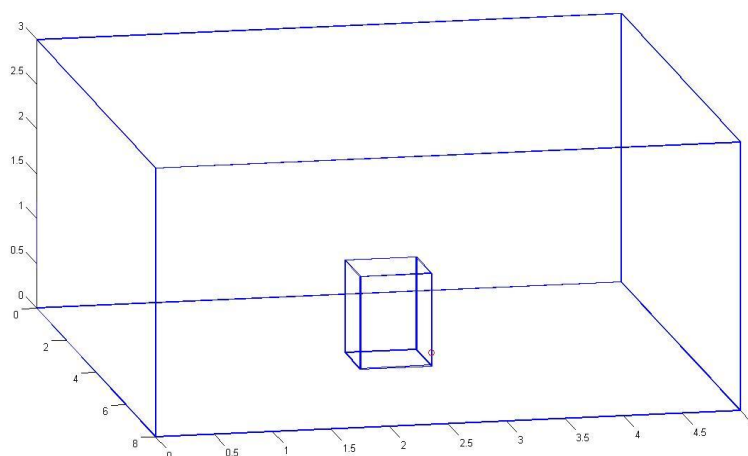
A.1 19. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (RFID)

## A.1.2.3.2. ZigBee



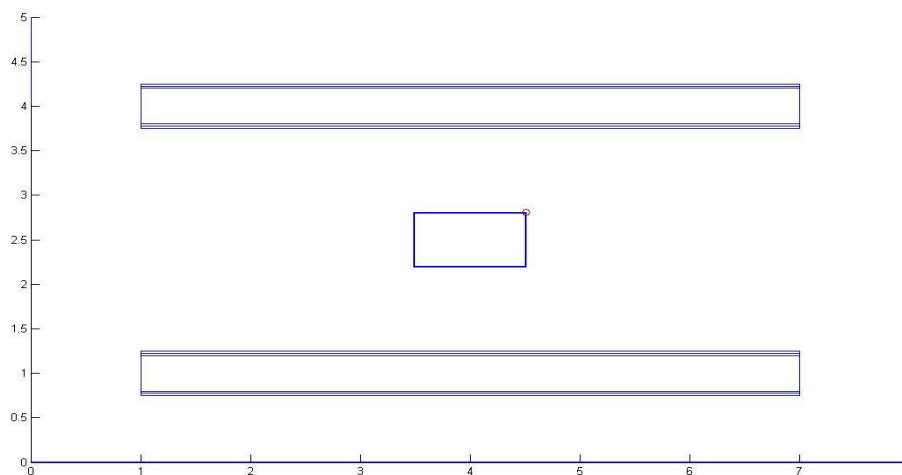
A.1 20. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (RFID)

## A.1.3 Posición 3



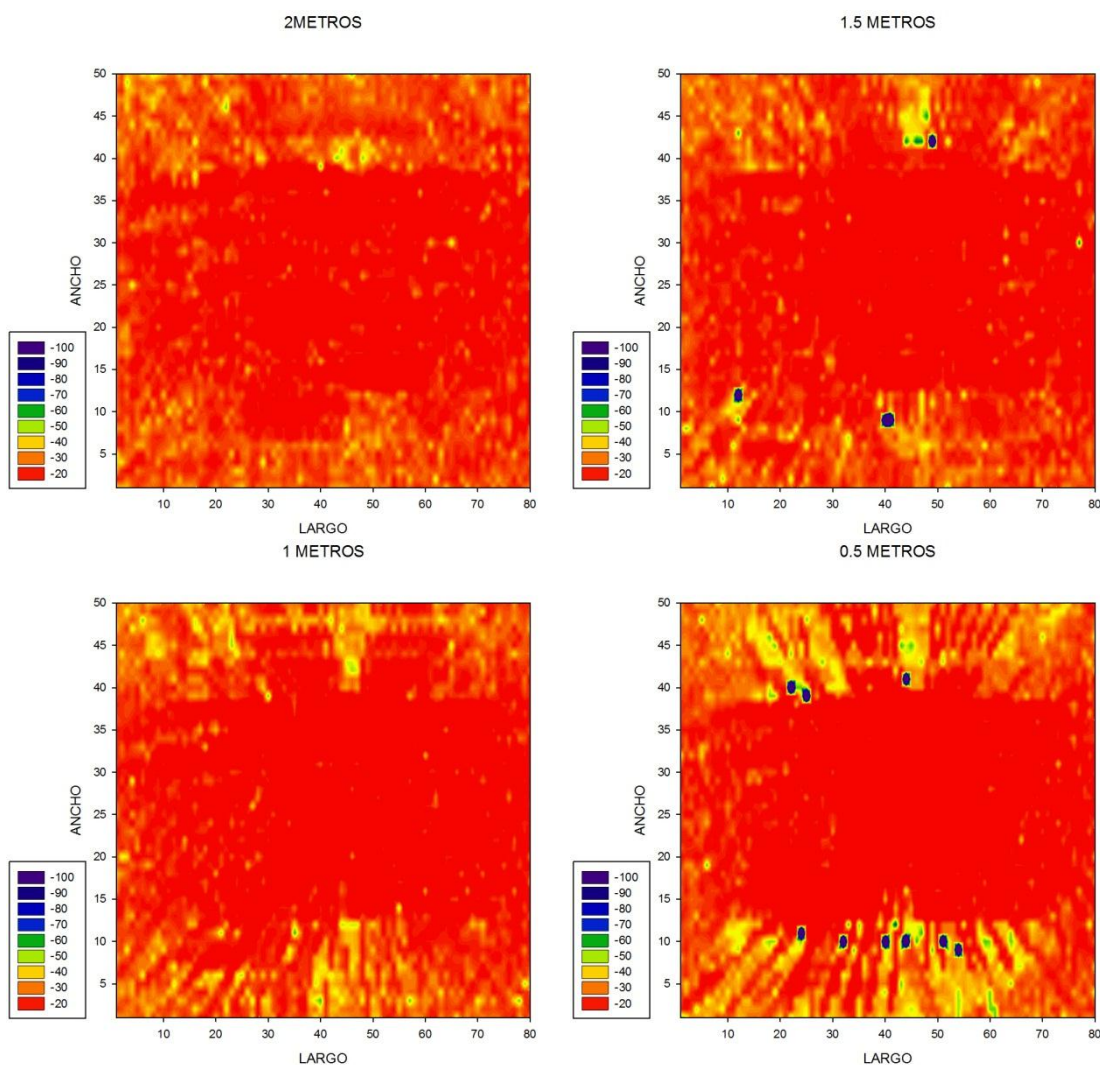
A.1 21. Posición antena 3

## A.1.3.1 Posición carro centro



A.1 22. Posición del carro en el centro

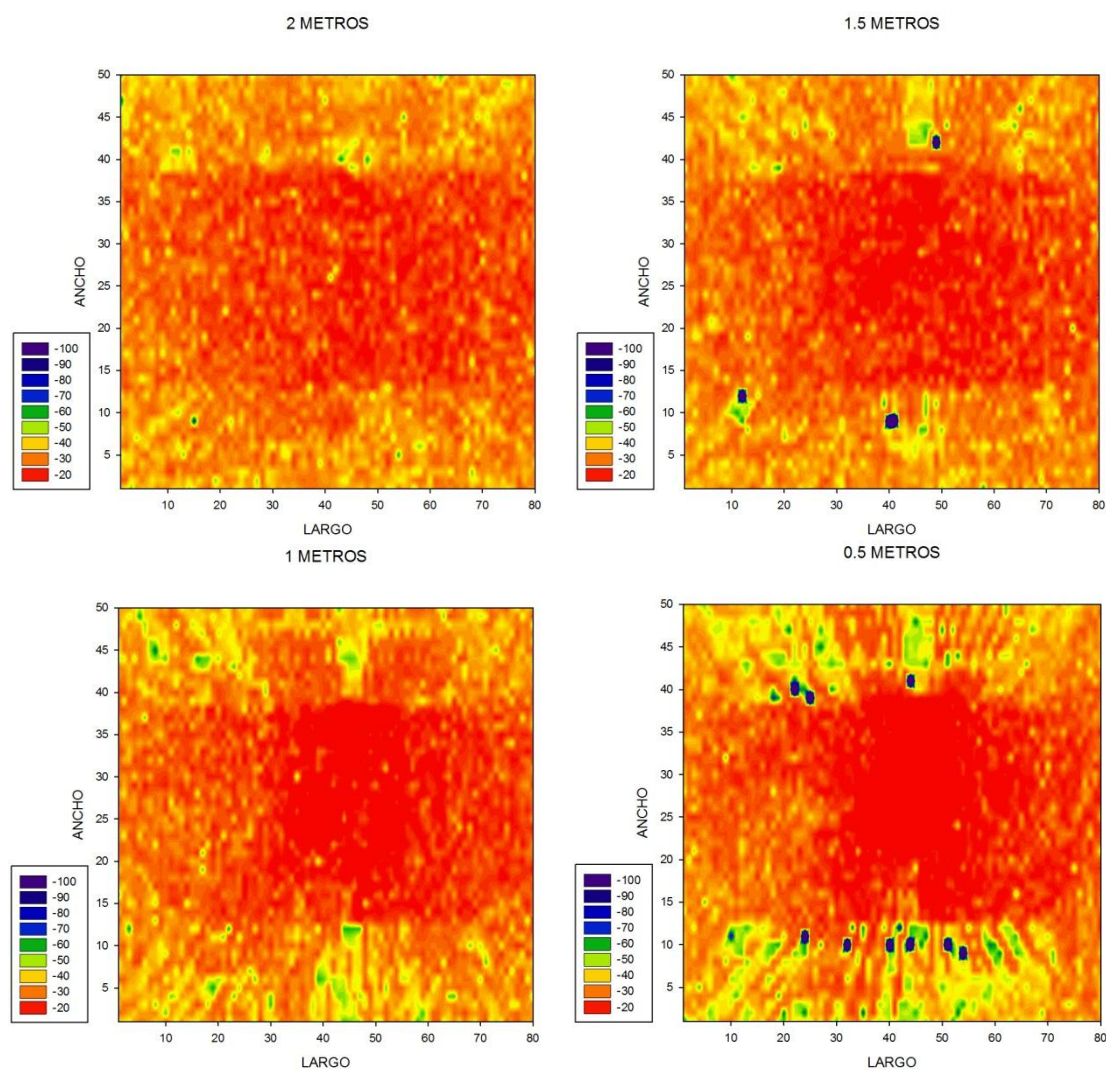
### A.1.3.1.1. RFID



A.1 23. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (RFID)



## A.1.3.1.2. ZigBee



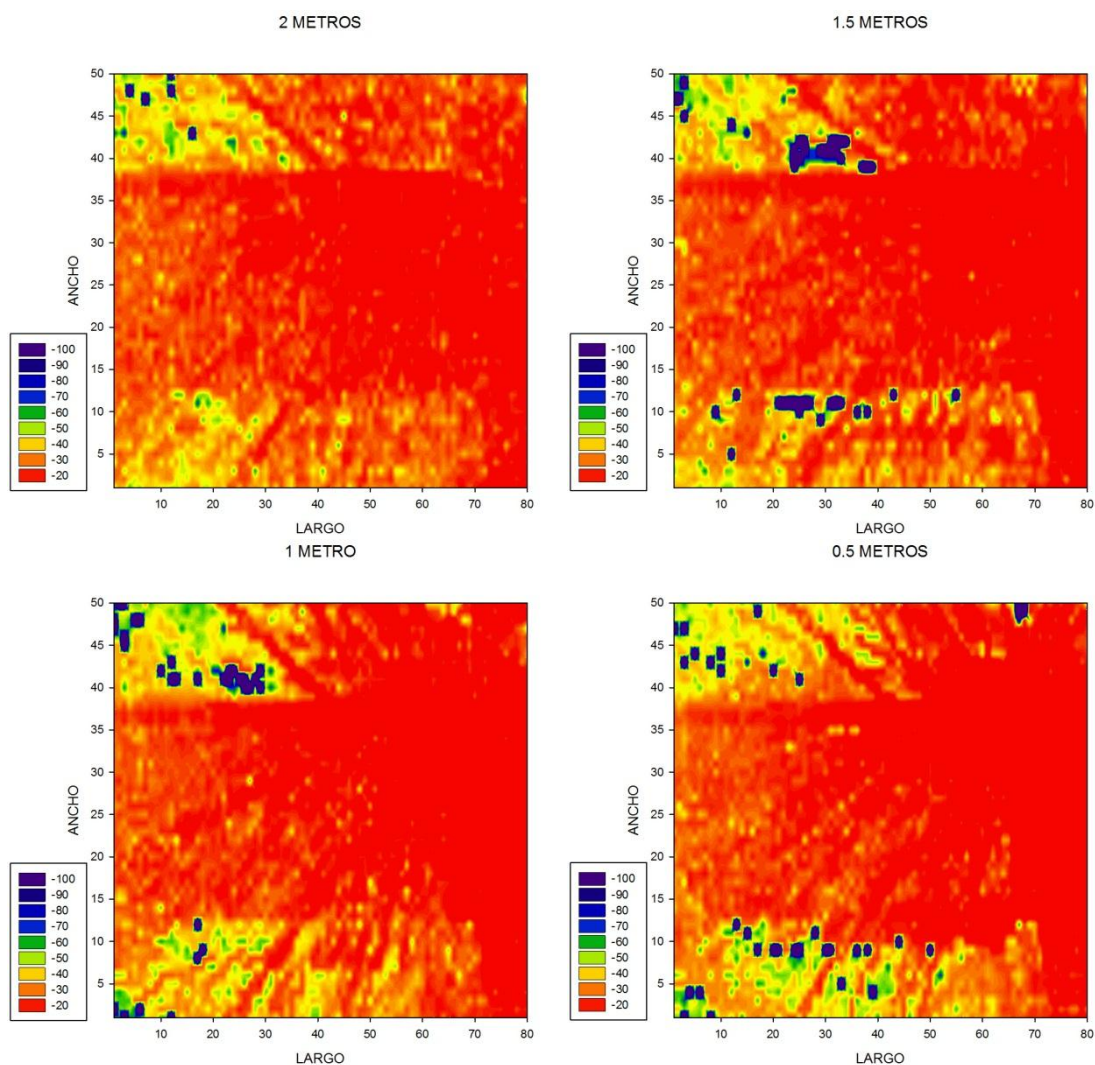
A.1 24. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (ZigBee)

## A.1.3.2 Posición carro estantería 1



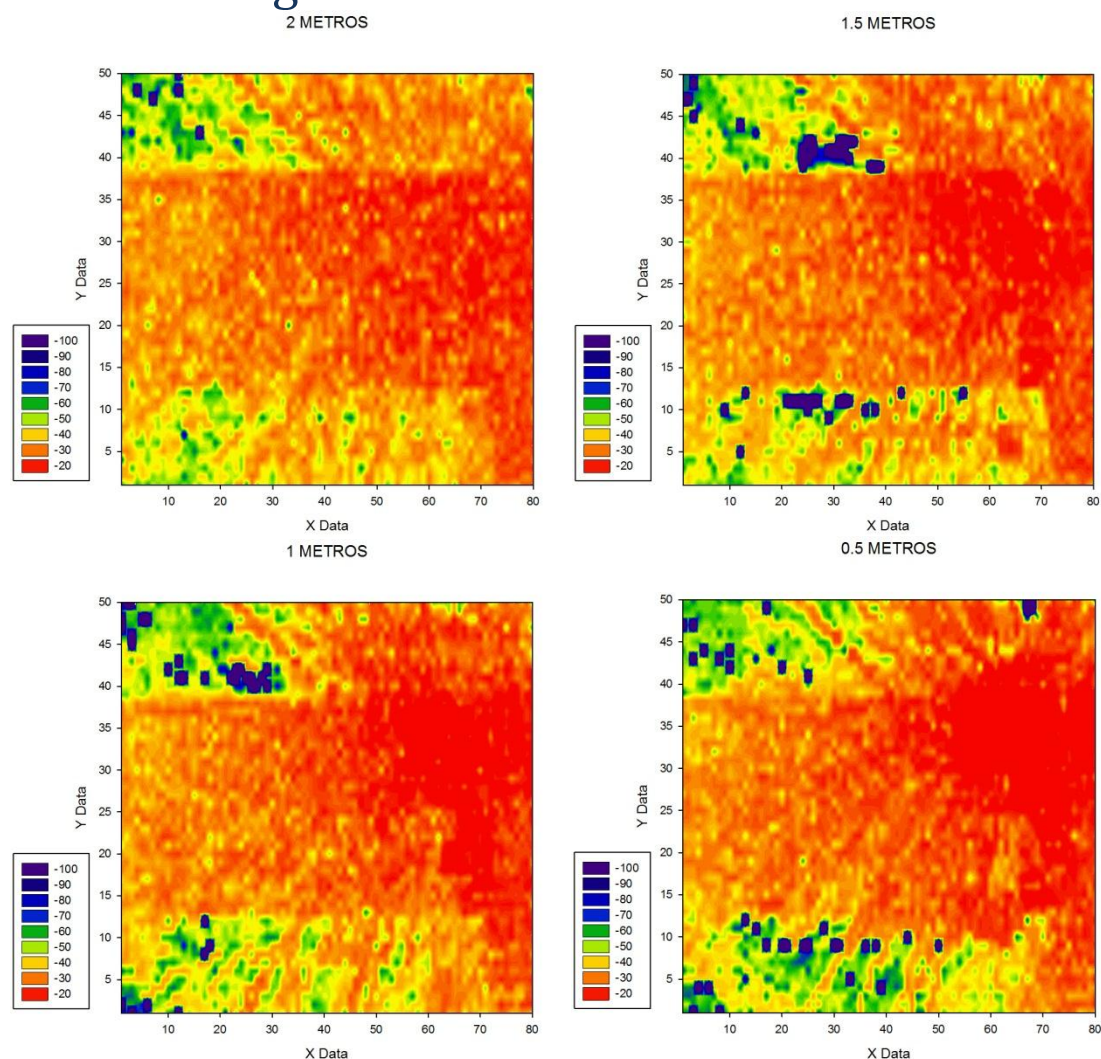
A.1 25. A.1 27. Posición del carro cerca de la estantería 1

## A.1.3.1.1. RFID



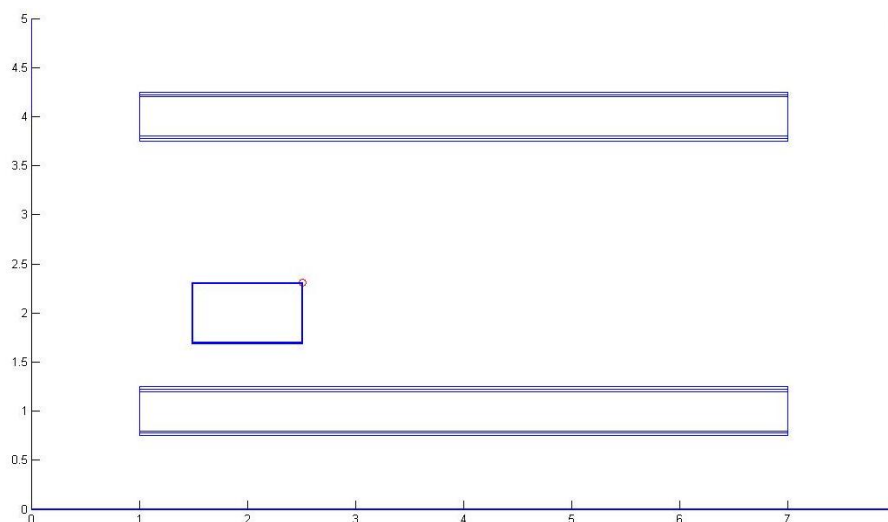
A.1 26. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (RFID).

## A.1.3.1.2. ZigBee



A.1 27. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (ZigBee).

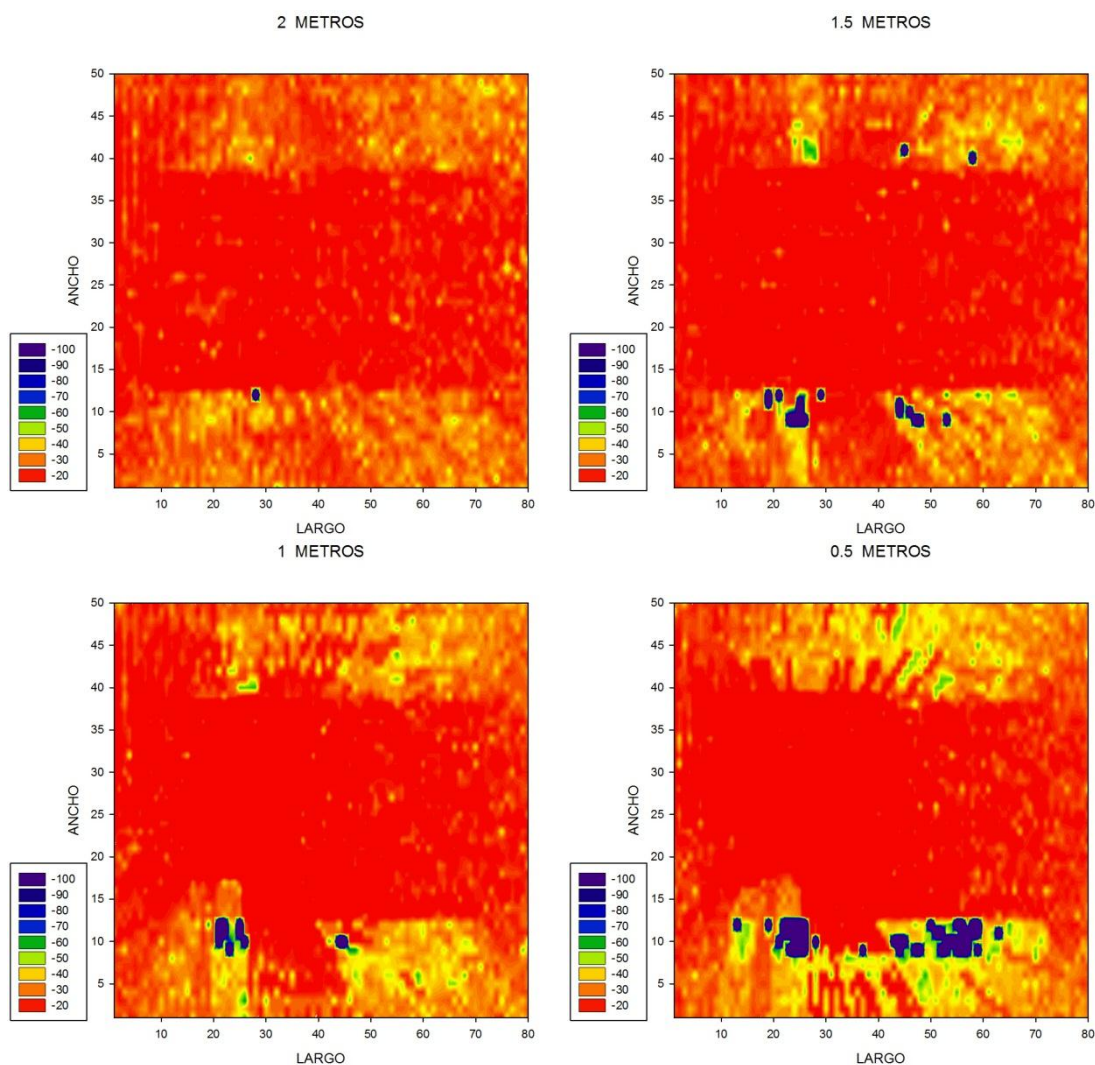
## A.1.3.3 Posición carro estantería 2



A.1 28. Posición del carro cerca de la estantería 2



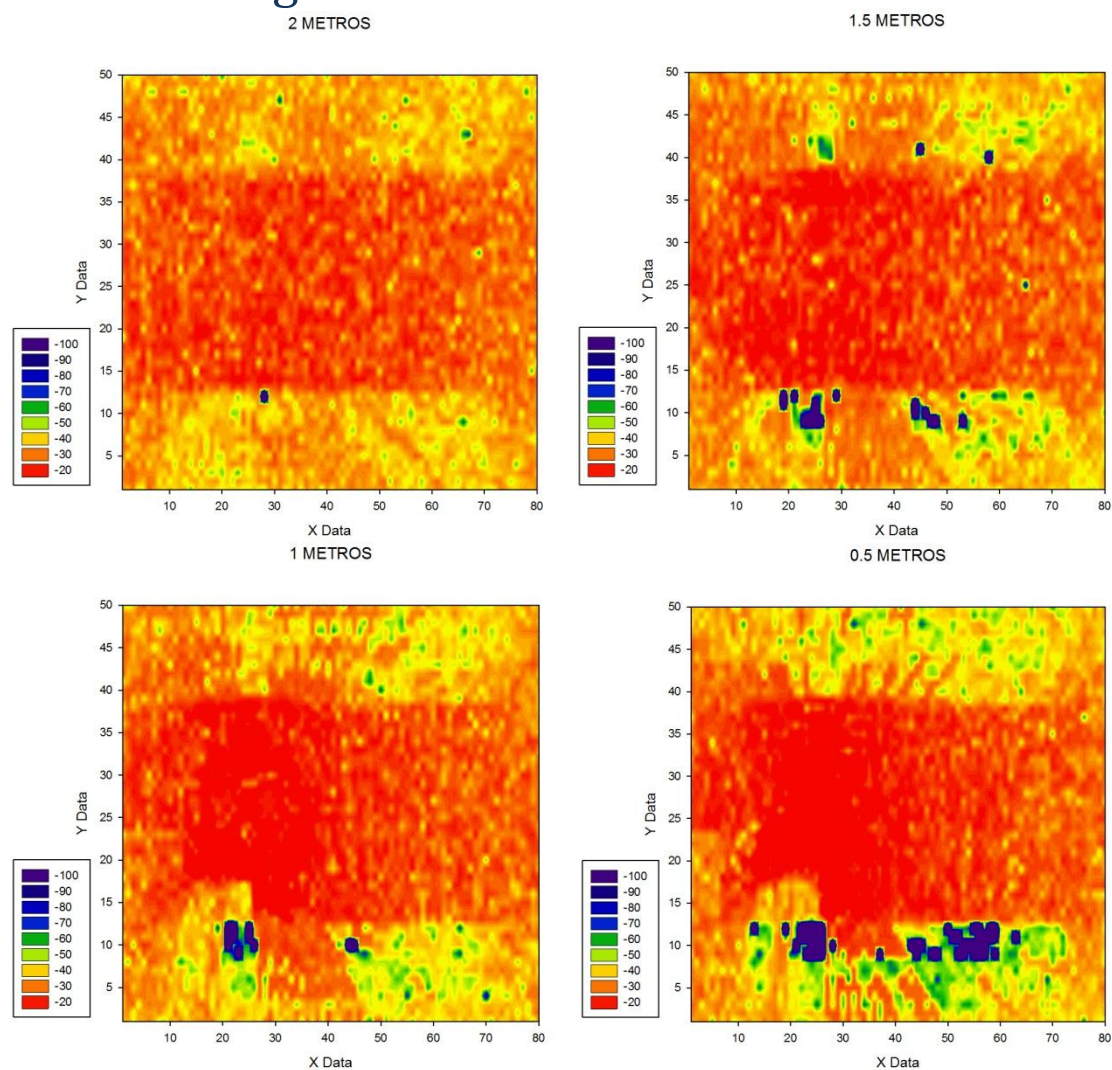
## A.1.3.2.1. RFID



A.1 29. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (RFID).

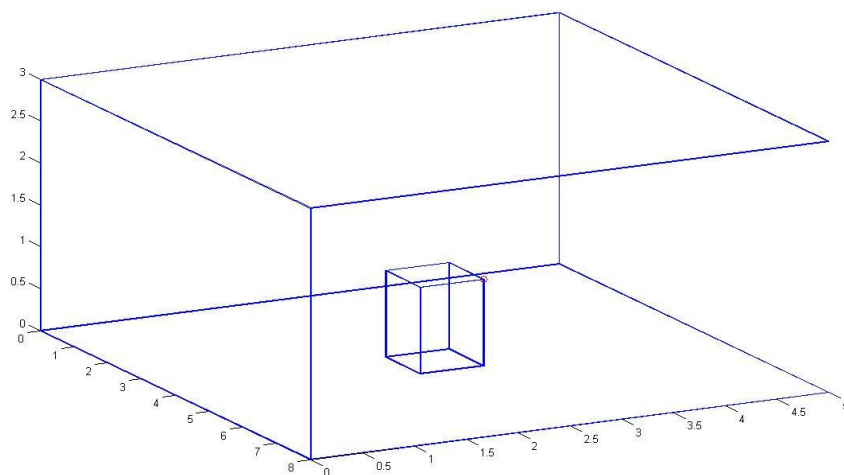


## A.1.3.2.2. ZigBee



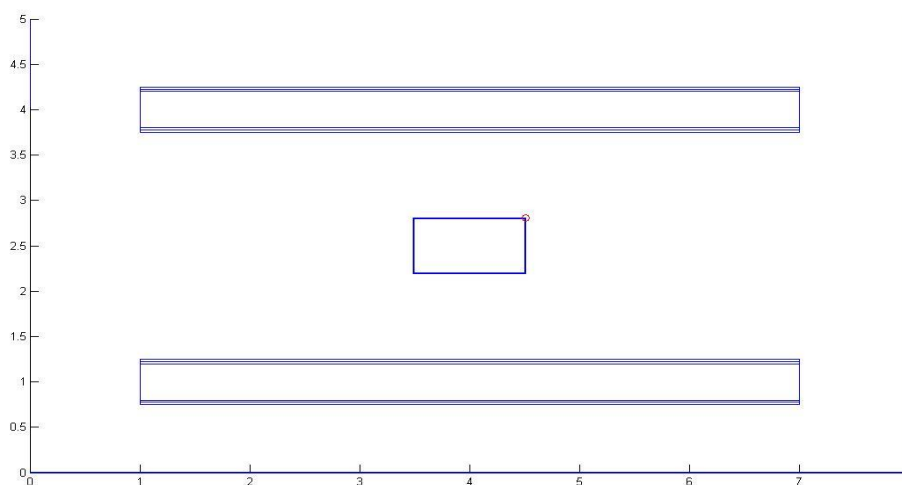
A.1 30. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (ZigBee).

## A.1.4 Posición 4



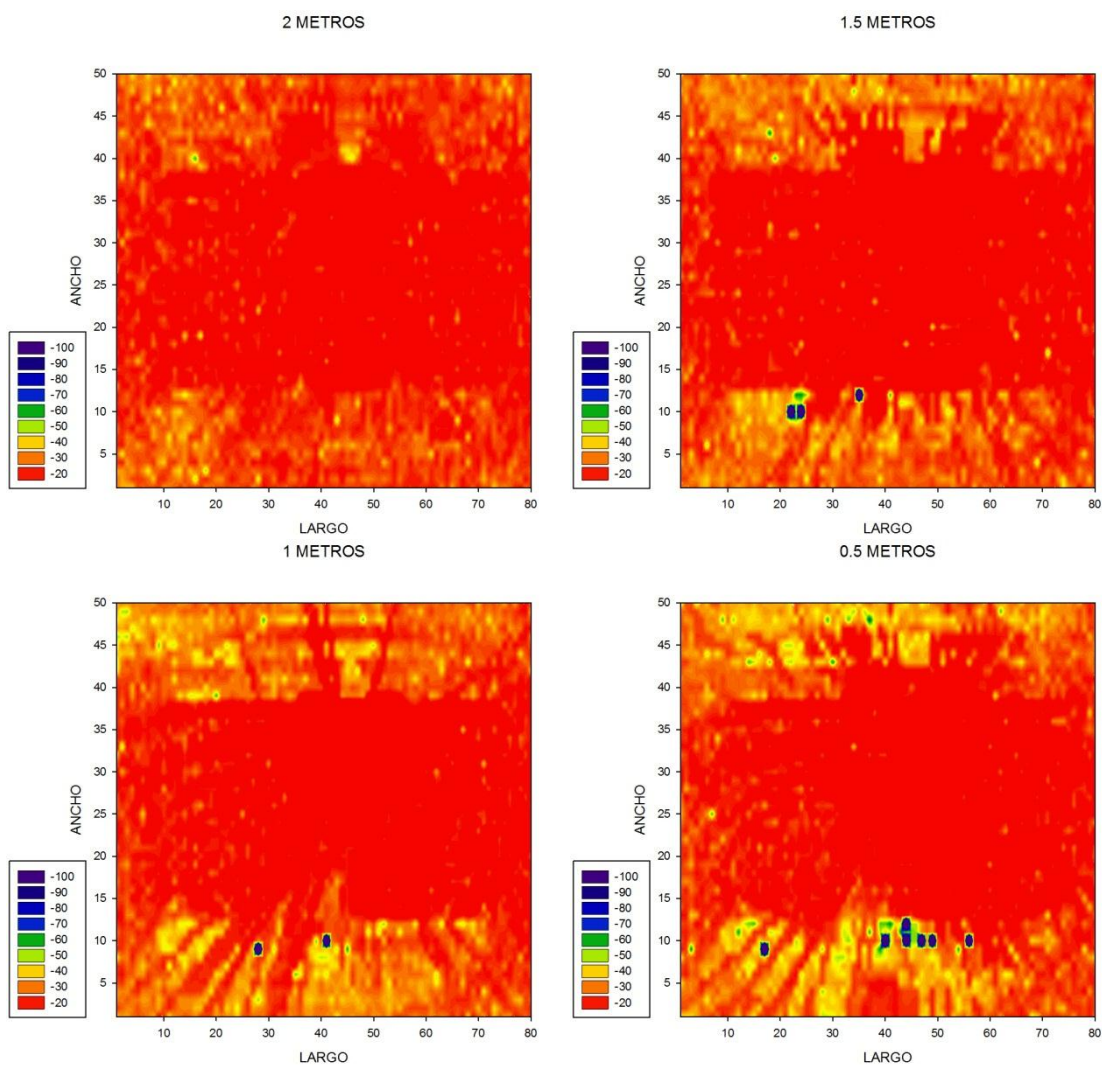
#### A.1 31. Posición antena 4

### A.1.4.1 Posición carro centro



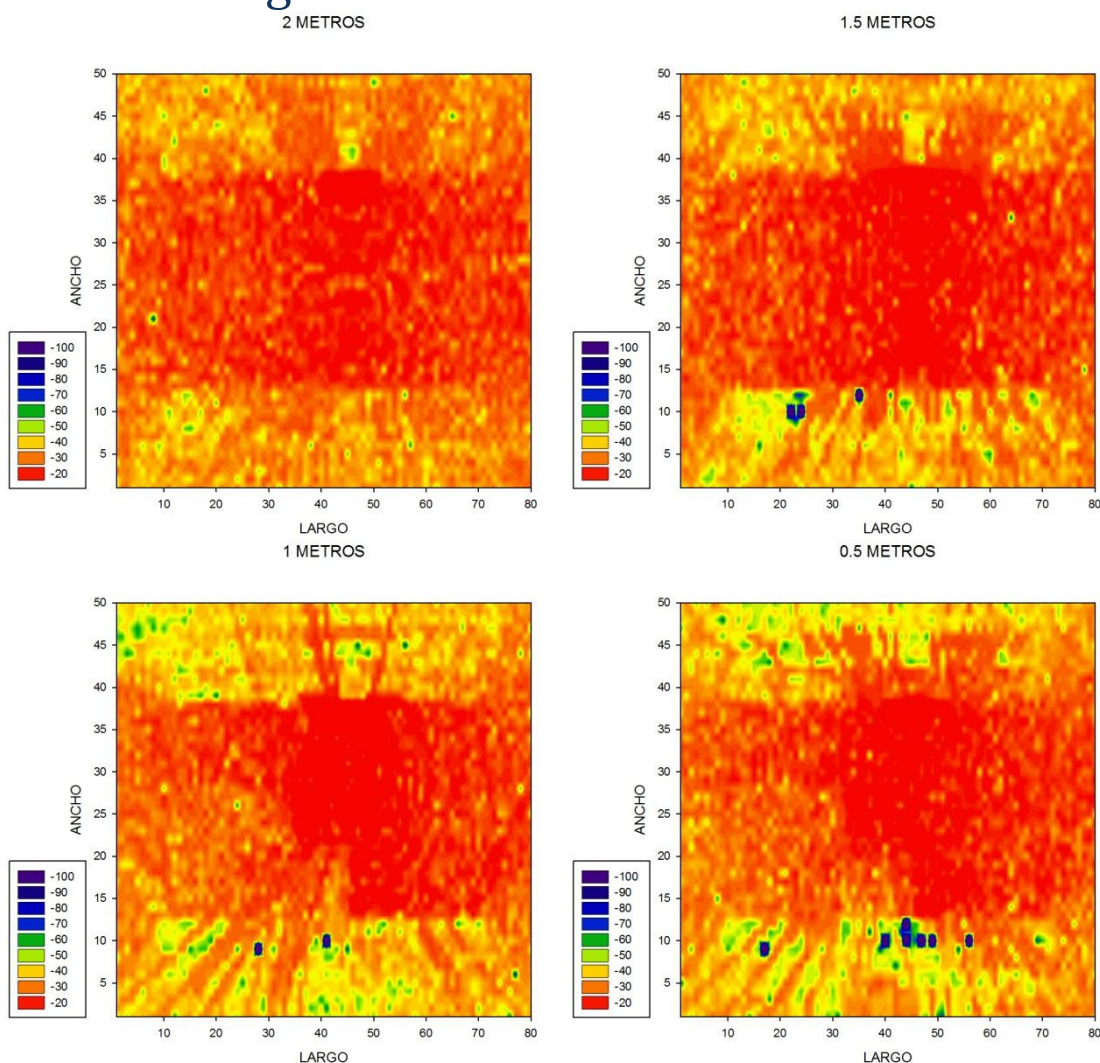
#### A.1 32. Posición del carro en el centro

## A.1.4.1.1. RFID



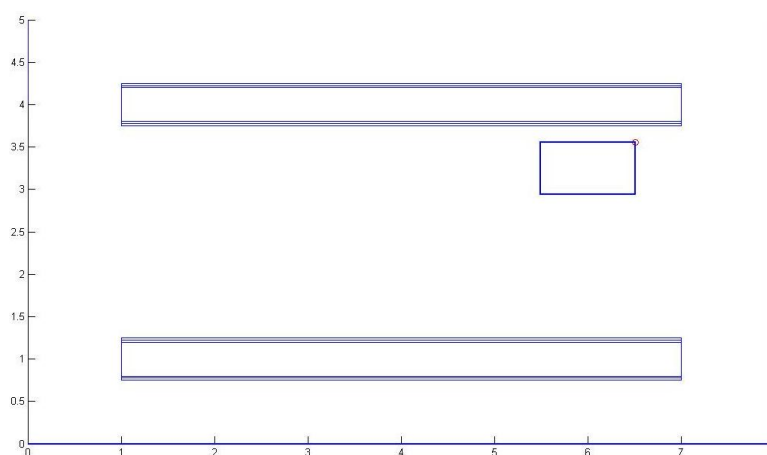
A.1 33. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (RFID).

## A.1.4.1.2. ZigBee



A.1 34. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (ZigBee).

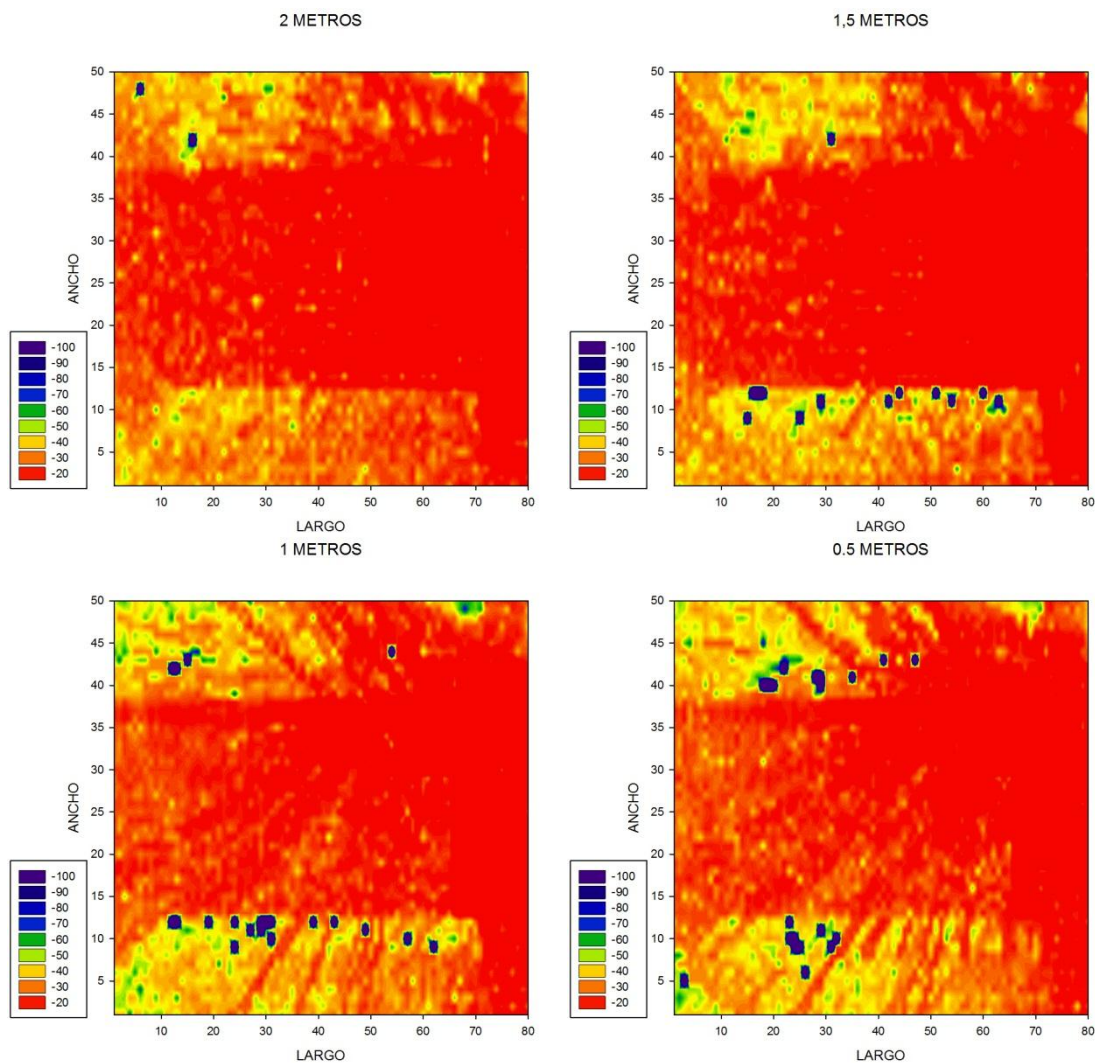
## A.1.4.2 Posición carro estantería 1



A.1 35. Posición del carro cerca de la estantería 1

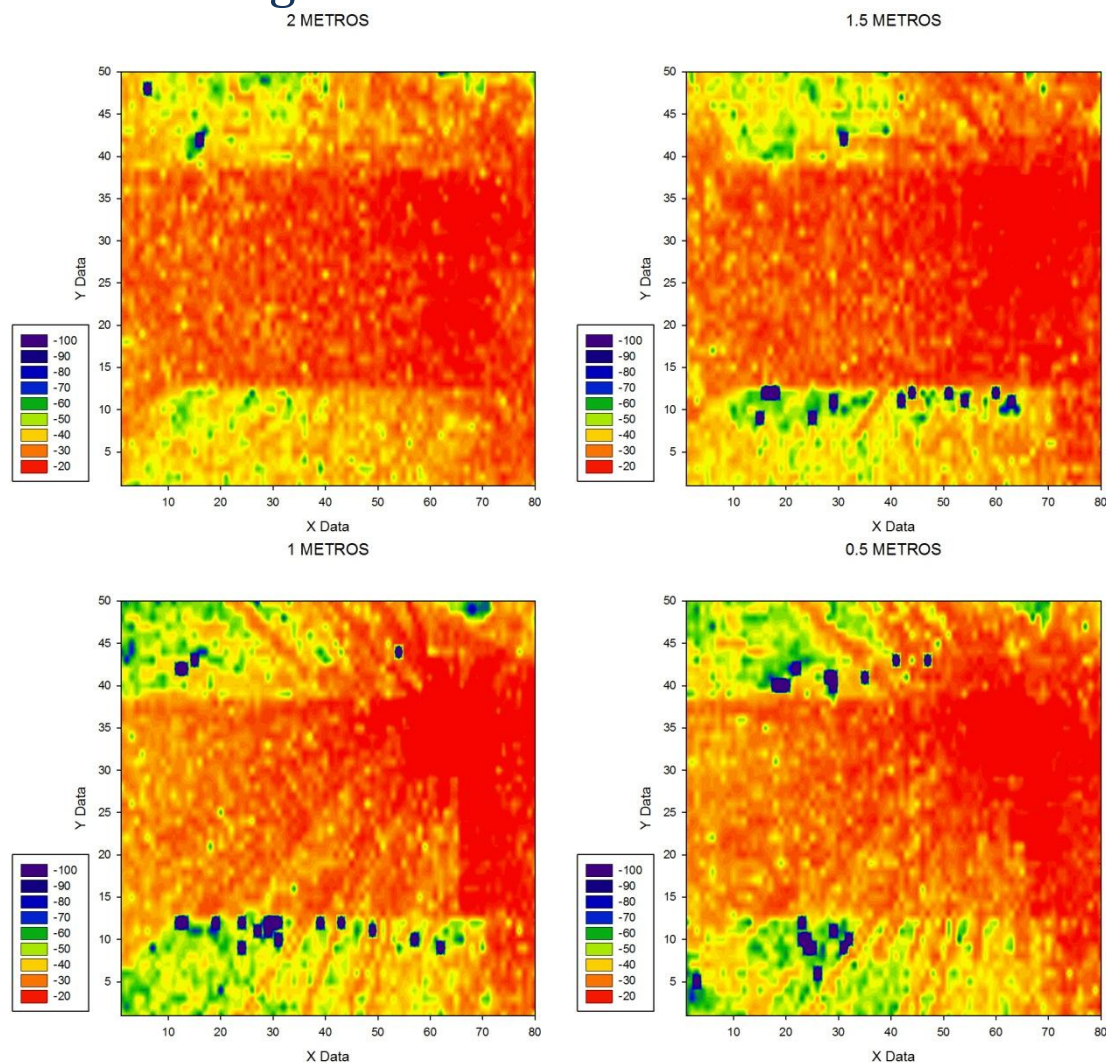


## A.1.4.1.1. RFID



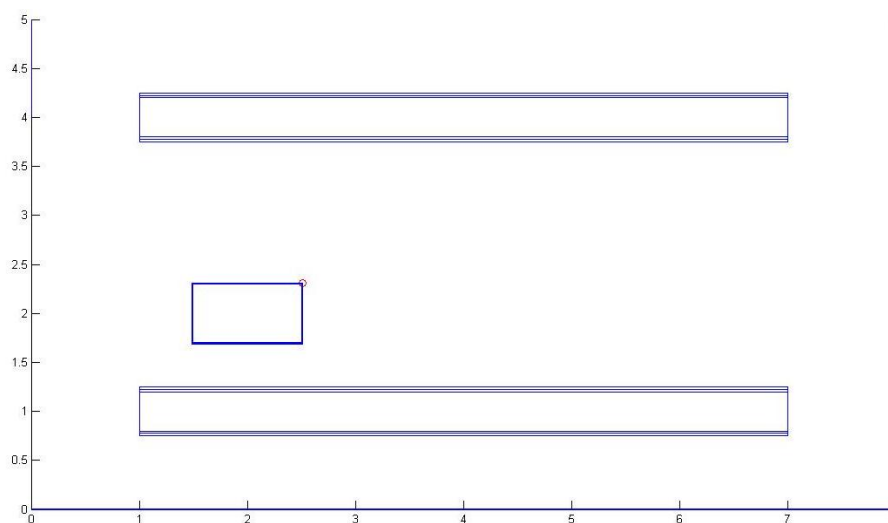
A.1 36. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (RFID).

## A.1.4.1.2. ZigBee



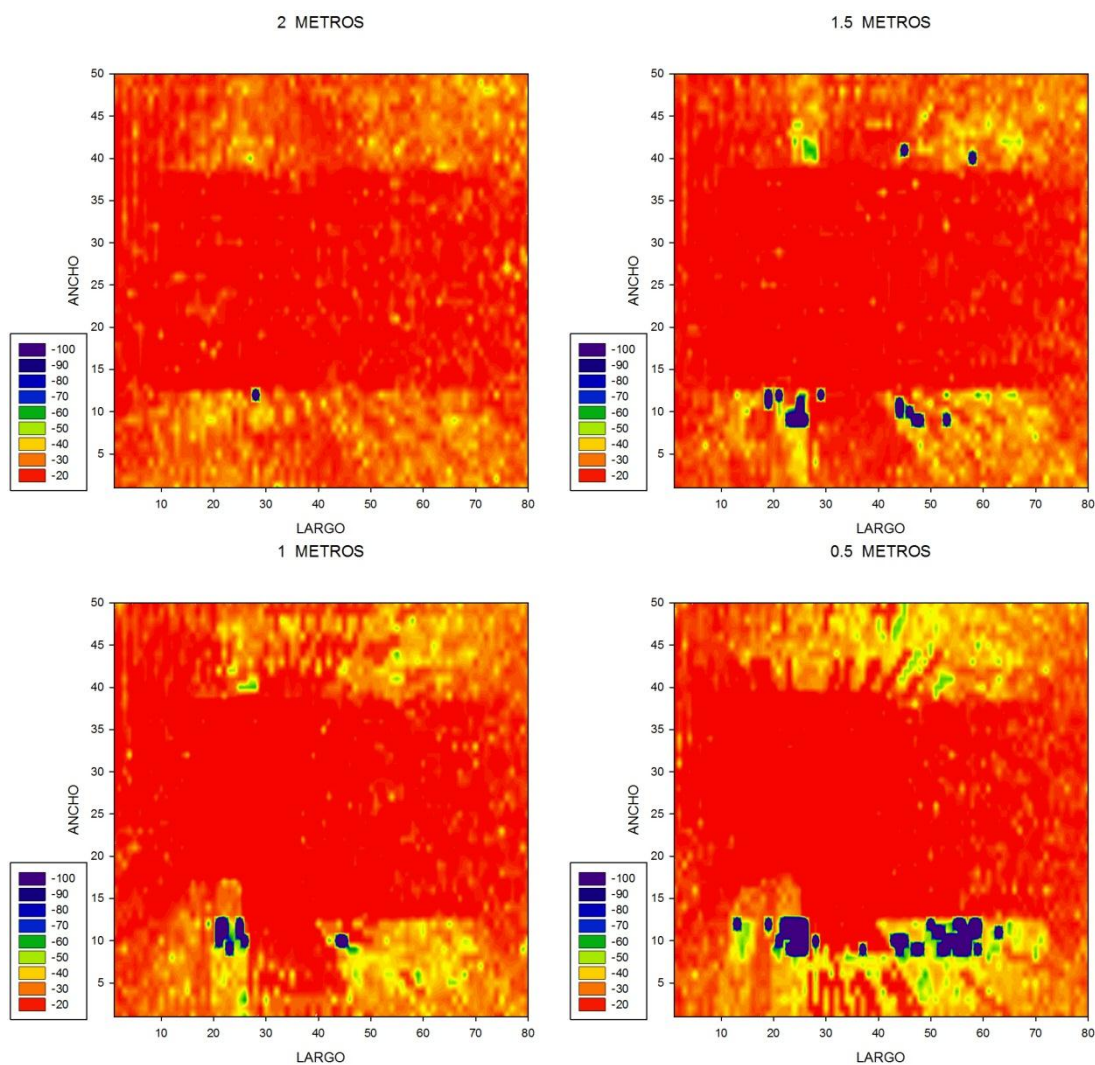
A.1 37. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (ZigBee).

## A.1.4.3 Posición carro estantería 2



A.1 38. Posición del carro cerca de la estantería 2

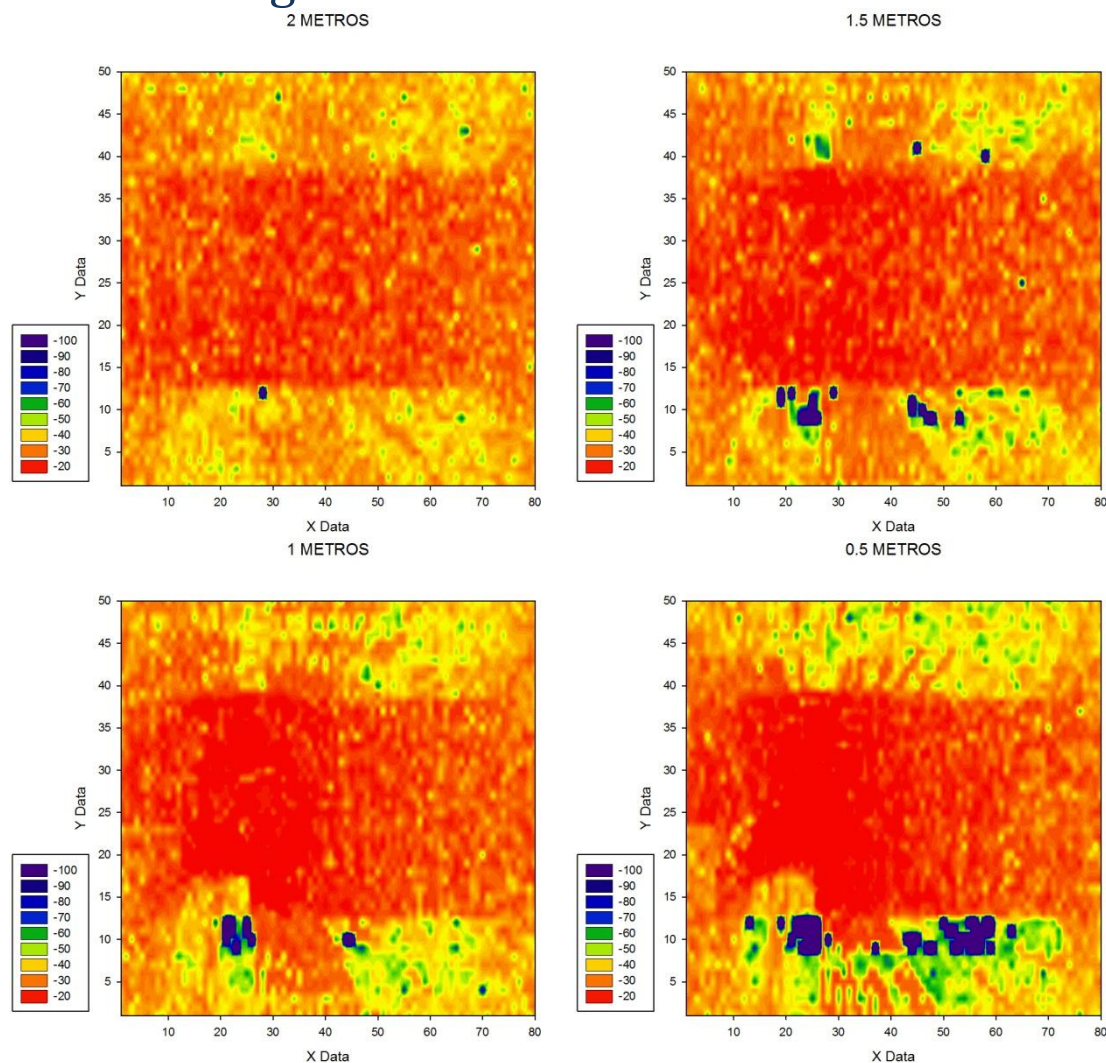
## A.1.4.2.1. RFID



A.1 39. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (RFID).



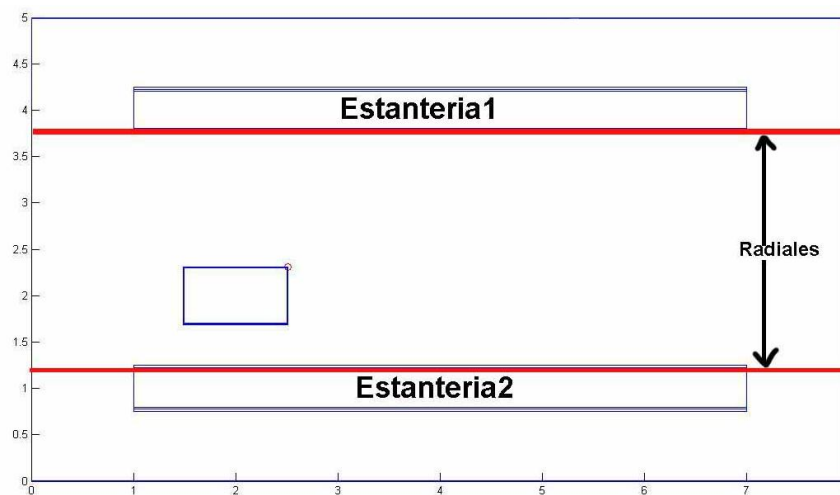
## A.1.4.2.2. ZigBee



A.1 40. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (ZigBee).

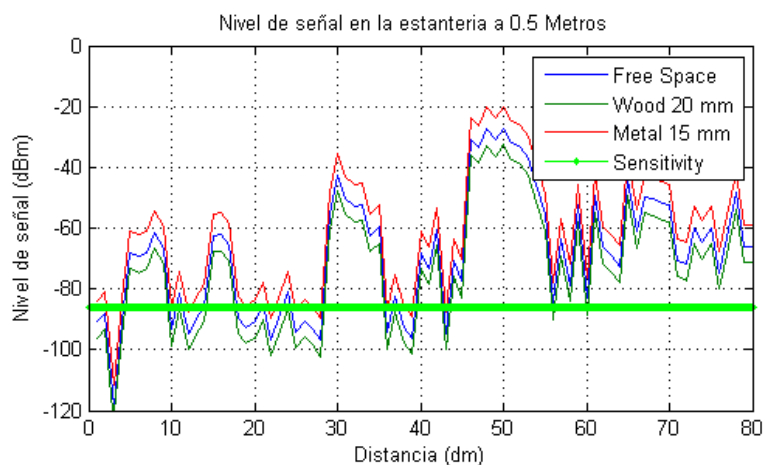
## A.1.5. Radiales estantería 2

A continuación se analizará las radiales correspondientes a la estantería 2

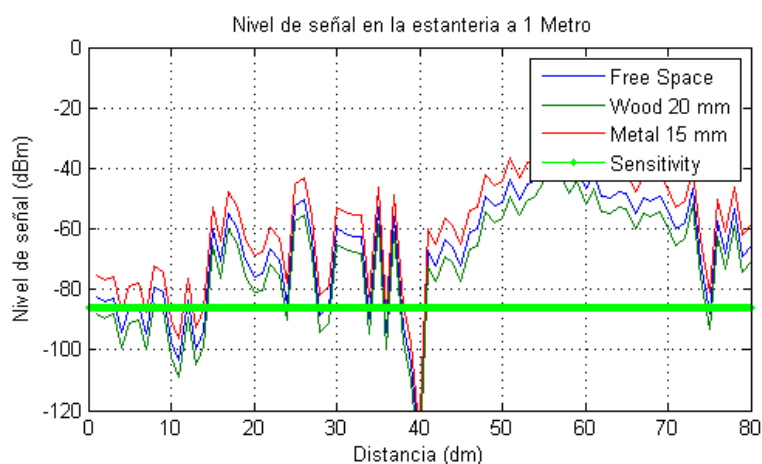


A.1 41. Localización de las radiales en el escenario

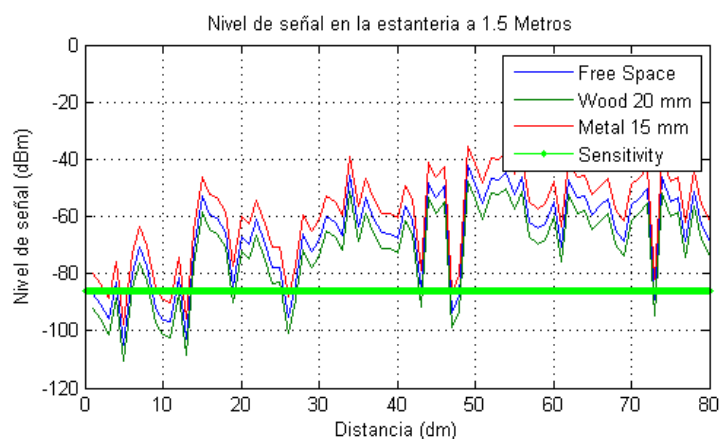
## A.1.5.1. Posición antena centro



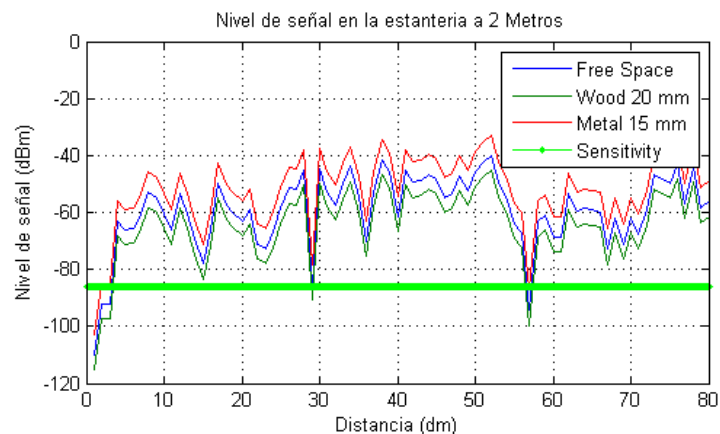
A.1 42. Nivel de potencia en la estantería 2 a 0.5 metros de altura



A.1 43. Nivel de potencia en la estantería 2 a 1 metro de altura

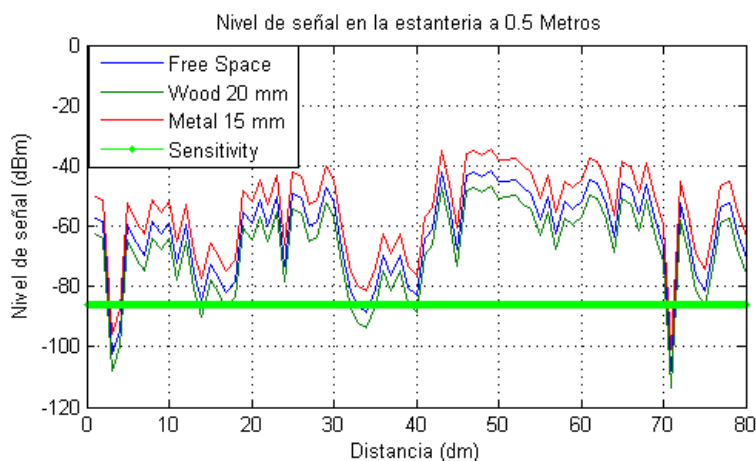


A.1 44. Nivel de potencia en la estantería 2 a 1.5 metros de altura

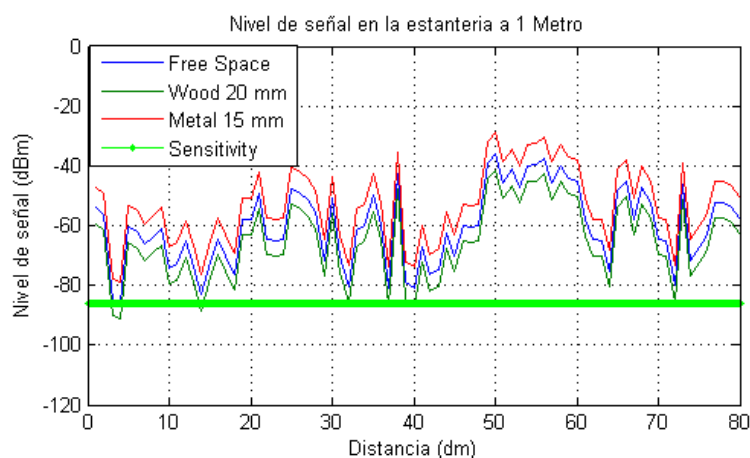


A.1 45. Nivel de potencia en la estantería 2 a 2 metros de altura

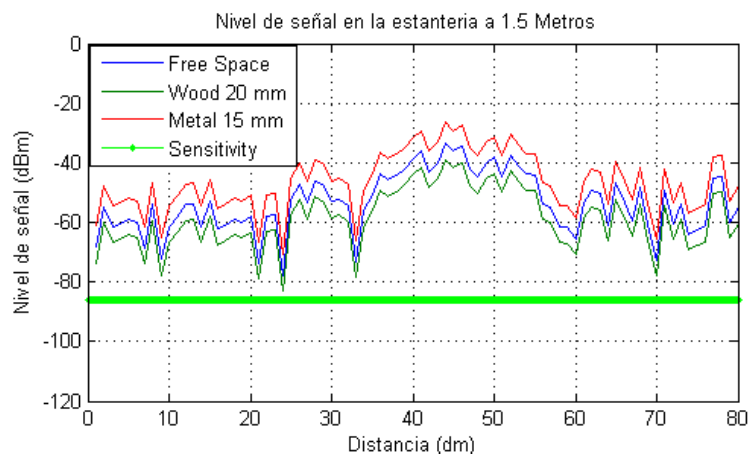
## A.1.5.1. Posición antena esquina



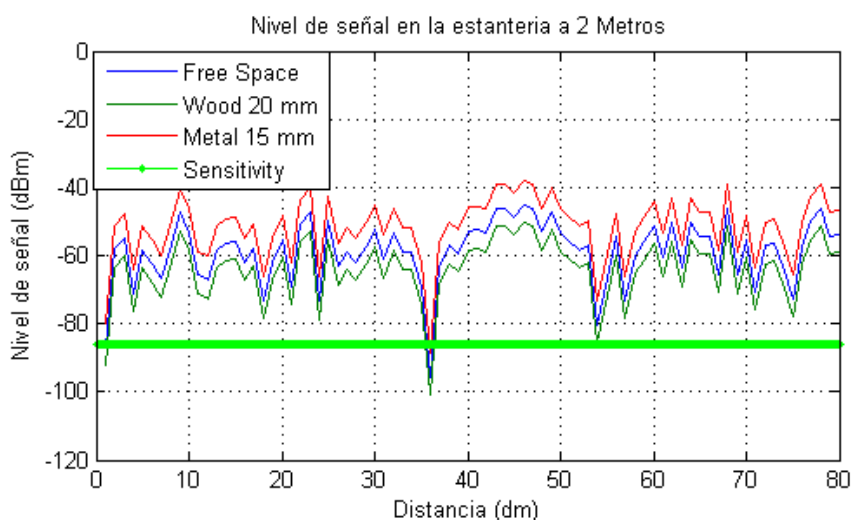
A.1 46. Nivel de potencia en la estantería 2 a 0.5 metros de altura



A.1 47. Nivel de potencia en la estantería 2 a 1 metro de altura



**A.1 48. Nivel de potencia en la estantería 2 a 1.5 metros de altura**



**A.1 49. Nivel de potencia en la estantería 2 a 2 metros de altura**

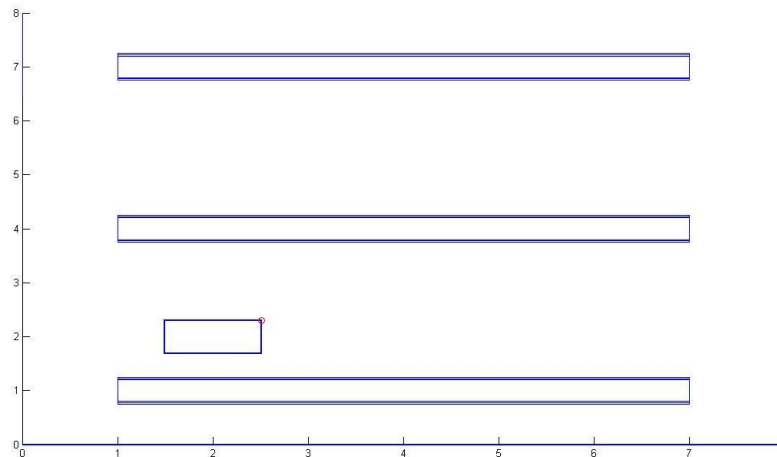
---

# ANEXO 2

## Escenarios Grandes

Como ya en el apartado 3.2.3. de la memoria hemos determinado que la mejor posición de antena es en la esquina superior, todos los escenarios que se presentan a continuación, tienen esa posición de antena

## A.2.1. Escenario con tres estanterías

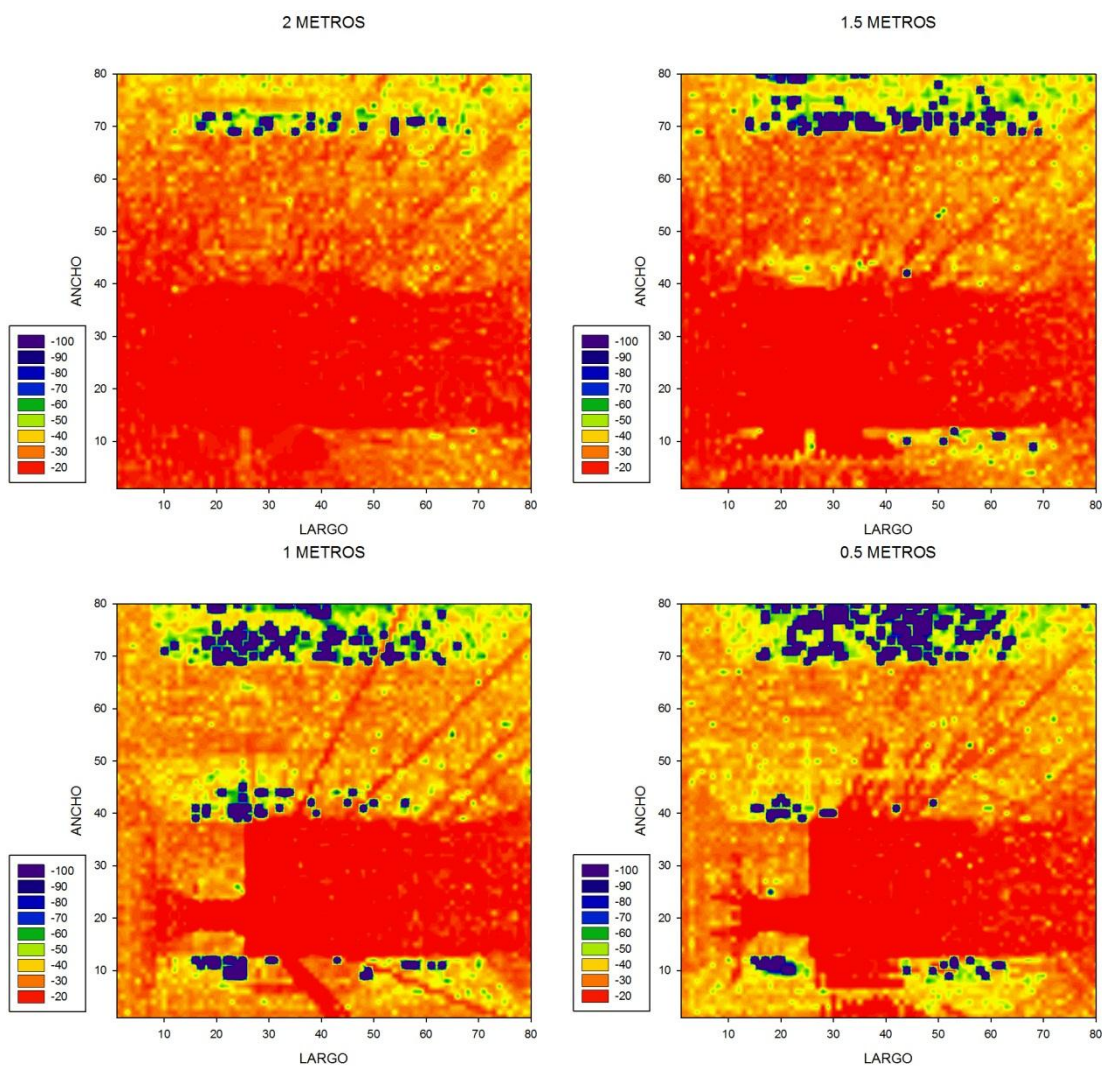


A.2. 1. Escenario con tres estanterías

Con la realización tiene como objetivo el averiguar si el nivel de señal es suficientemente alto en una tercera estantería, para realizar un radioenlace.

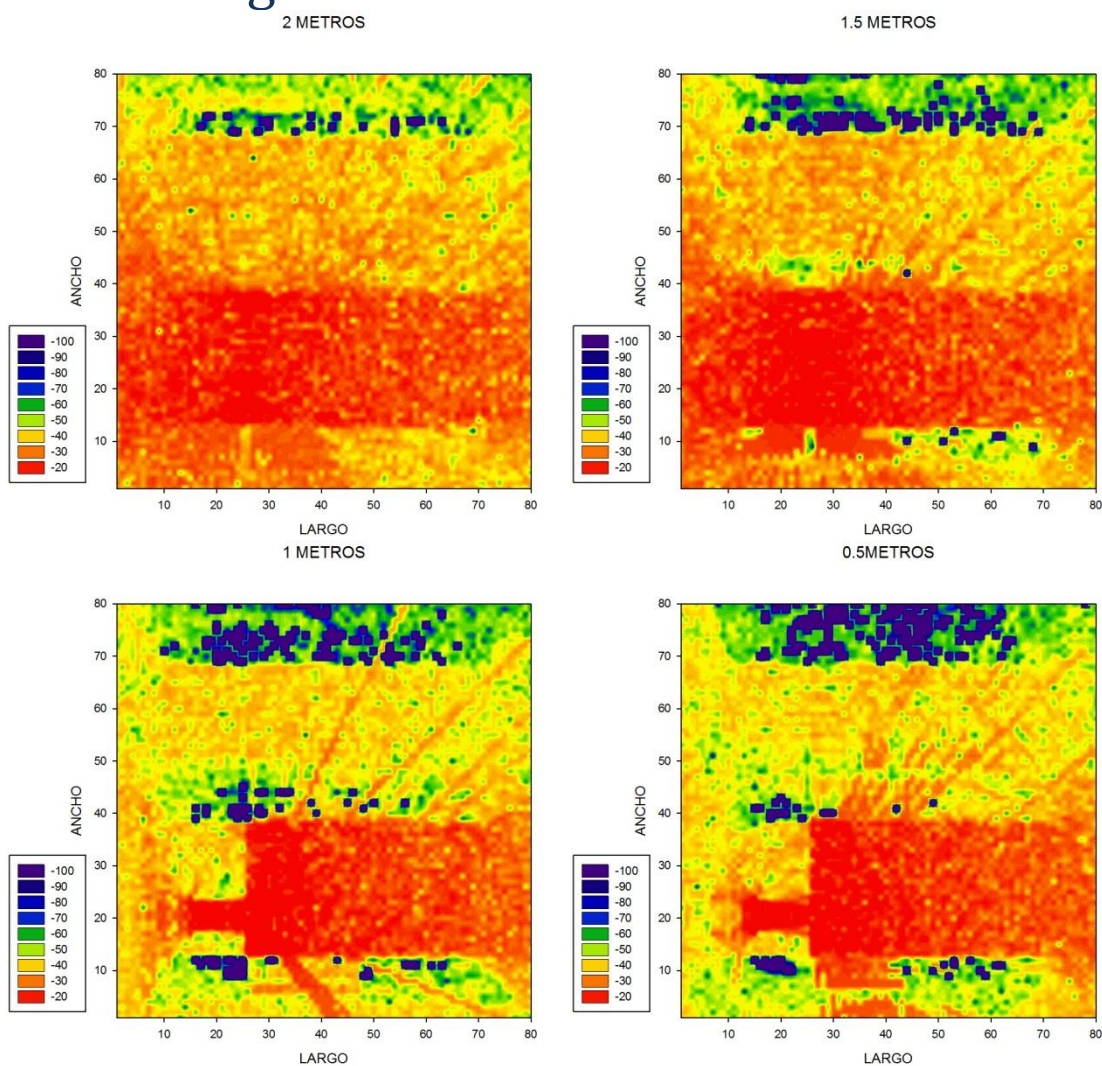


## A.2.1.1.RFID



A.2. 2. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (RFID).

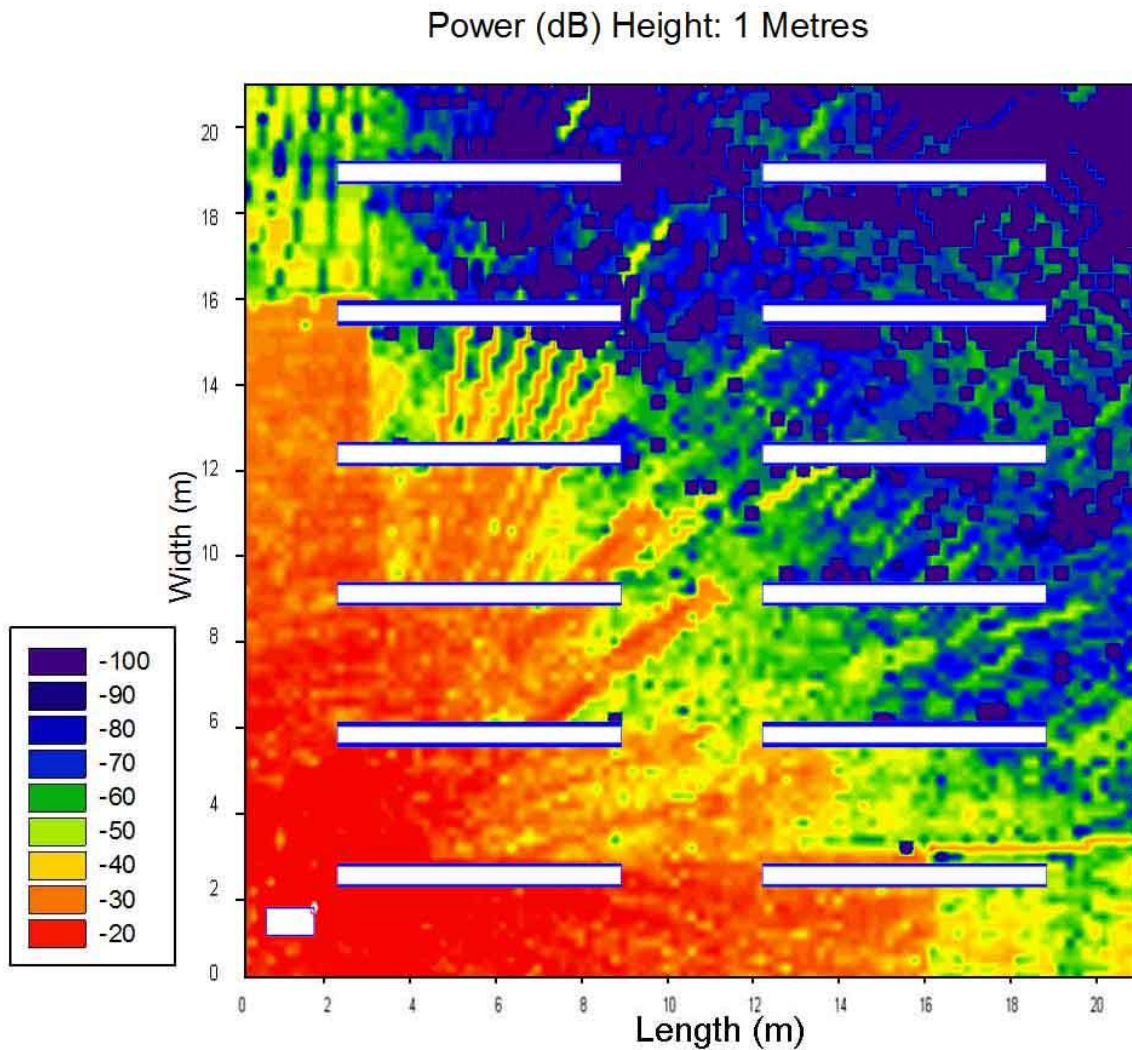
## A.2.1.2. ZigBee



A.2. 3. Niveles de potencia para alturas de 2, 1.5, 1 y 0.5 metros respectivamente (ZigBee).

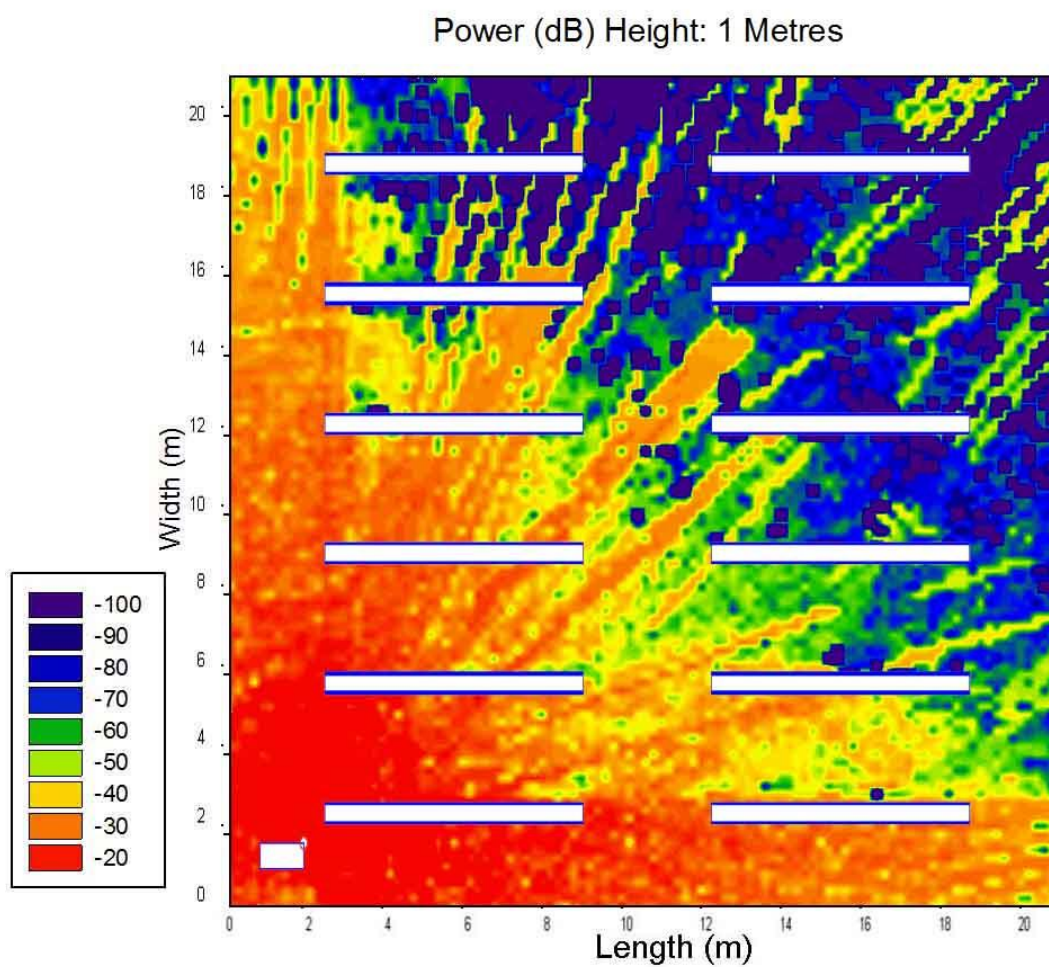
## A.2.2. Escenario Grande 1

Este escenario tiene unas dimensiones de 21(m) x 21(m) x 3(m) de largo, ancho y alto respectivamente. Cuenta con 12 estanterías. El pasillo central tiene una anchura de 3 metros. A continuación se muestran los resultados tanto de RFID como ZigBee a una altura de un metro cuando el carro se encuentra .



A.2. 4. Nivel de potencia a 1 metro de altura para (RFID)

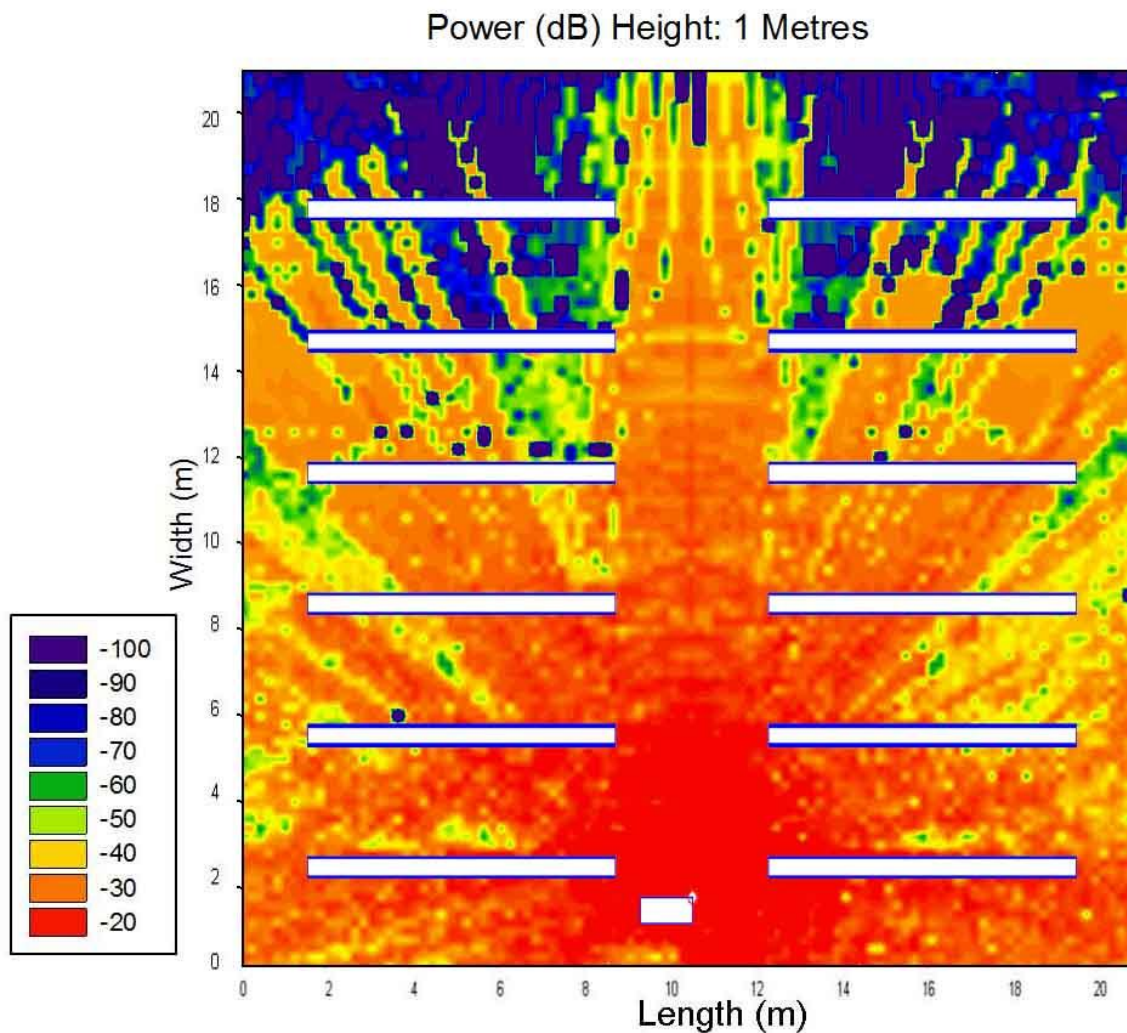




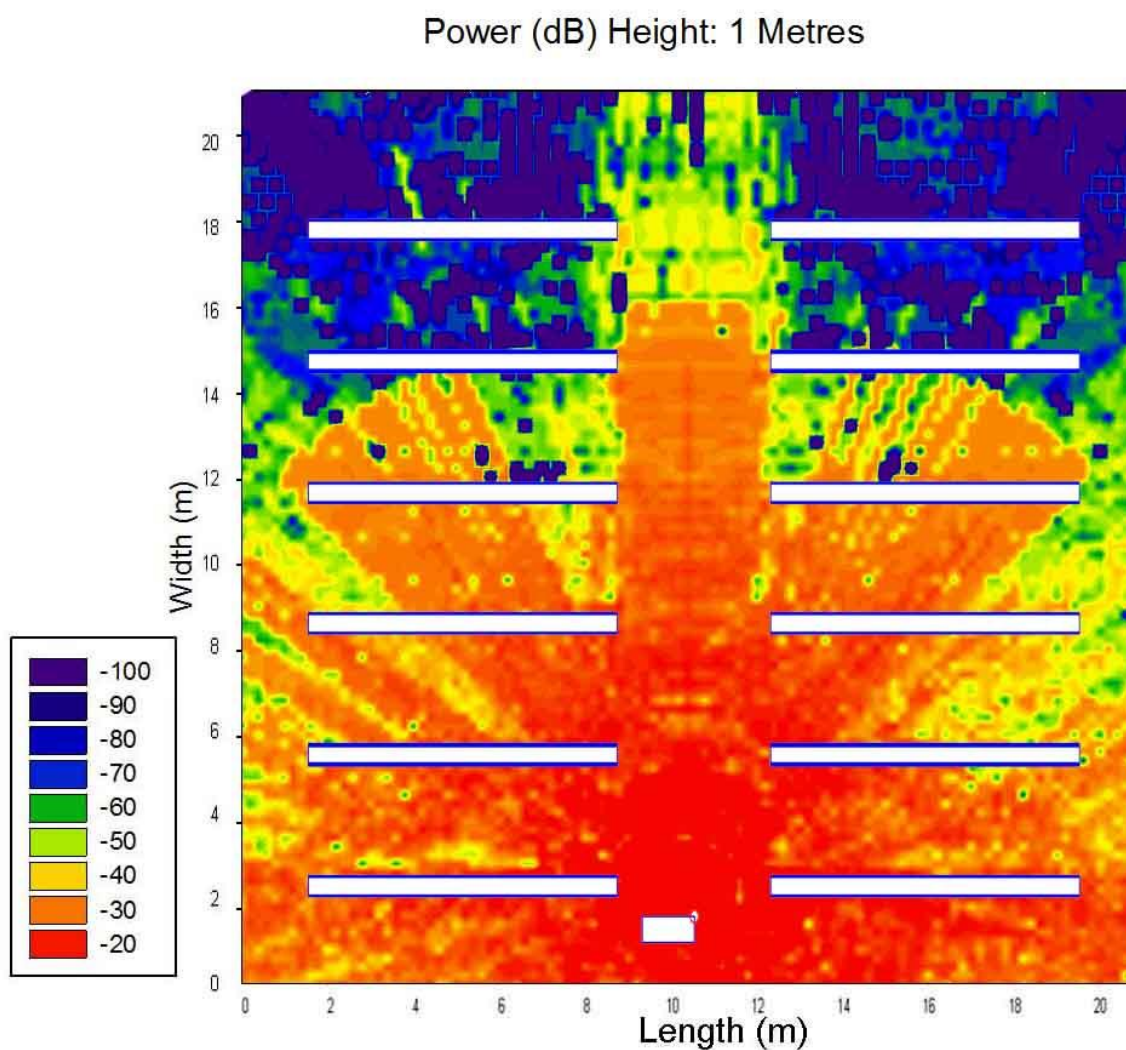
A.2. 5. Nivel de potencia a 1 metro de altura para (ZigBee)

## A.2.3. Escenario Grande 2

Se trata del mismo escenario anterior pero con diferente posición de carro



A.2. 6. Nivel de potencia a 1 metro de altura para (RFID)

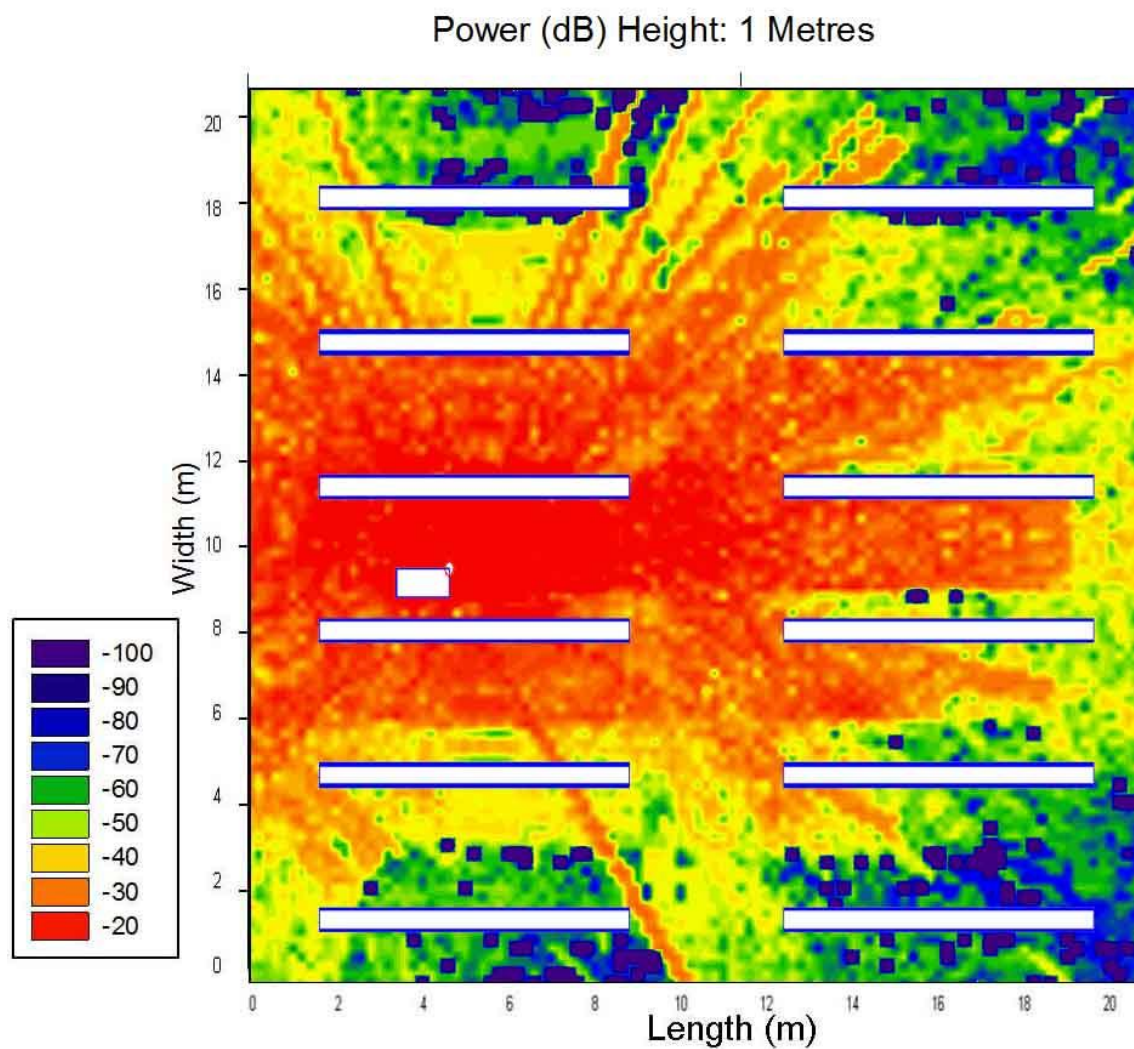


A.2. 7. Nivel de potencia a 1 metro de altura para (ZigBee)

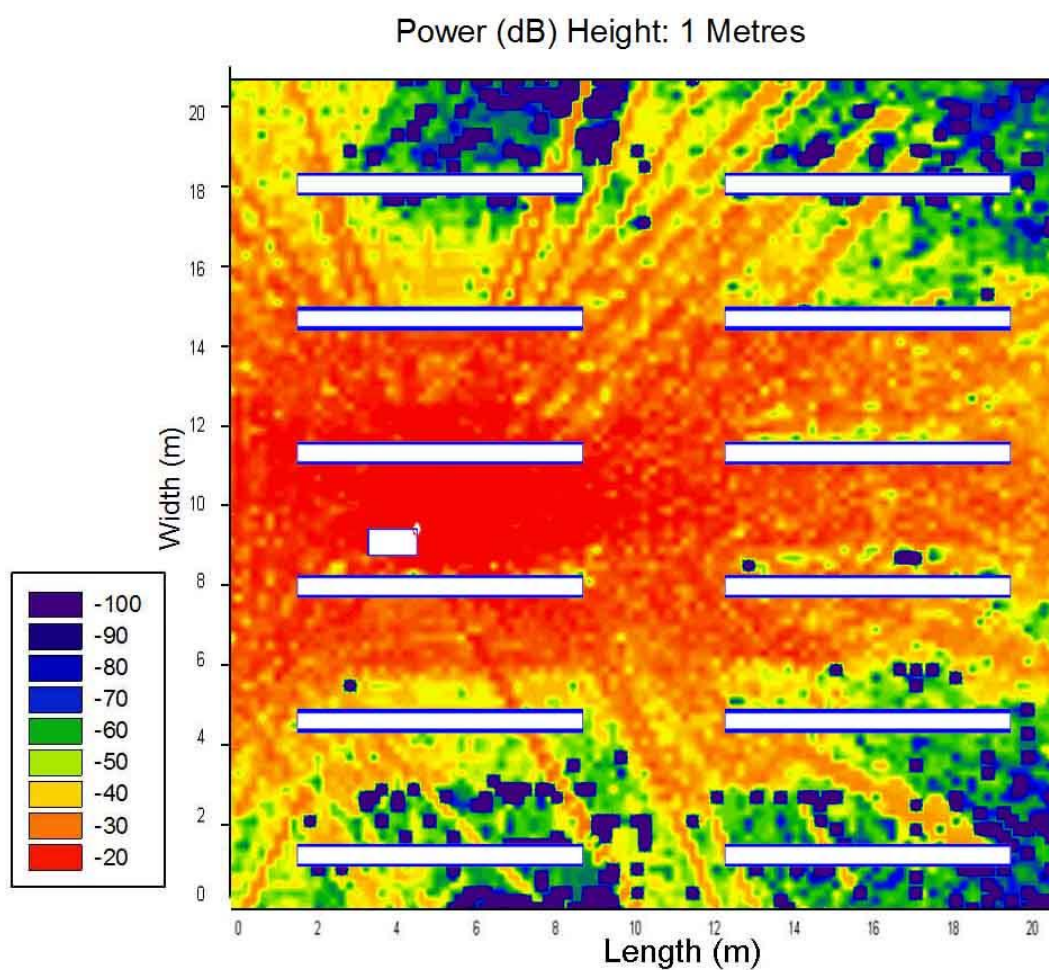


## A.2.3. Escenario Grande 3

Se trata del mismo escenario anterior pero con diferente posición de carro



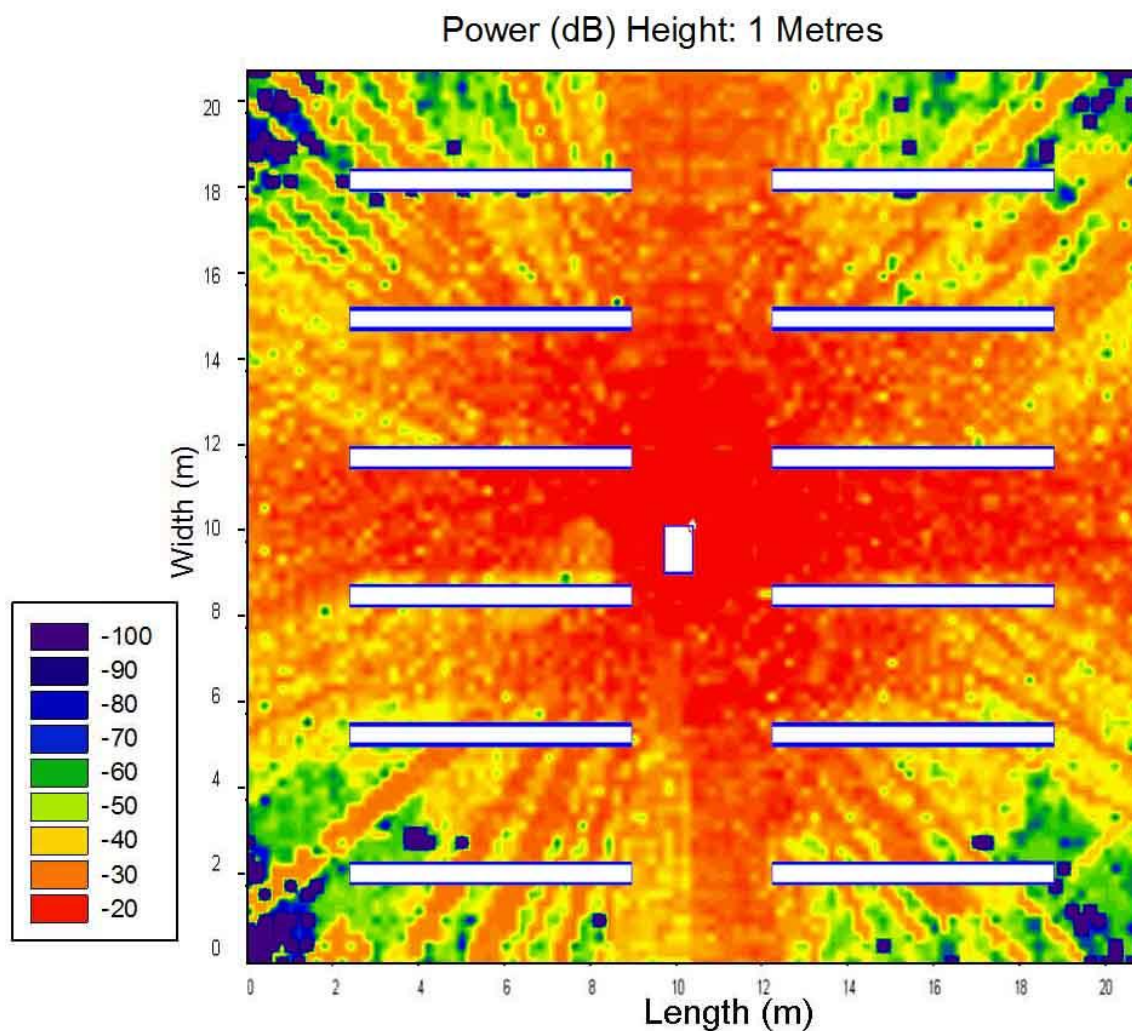
A.2. 8. Nivel de potencia a 1 metro de altura para (RFID)



A.2. 9. Nivel de potencia a 1 metro de altura para (ZigBee)

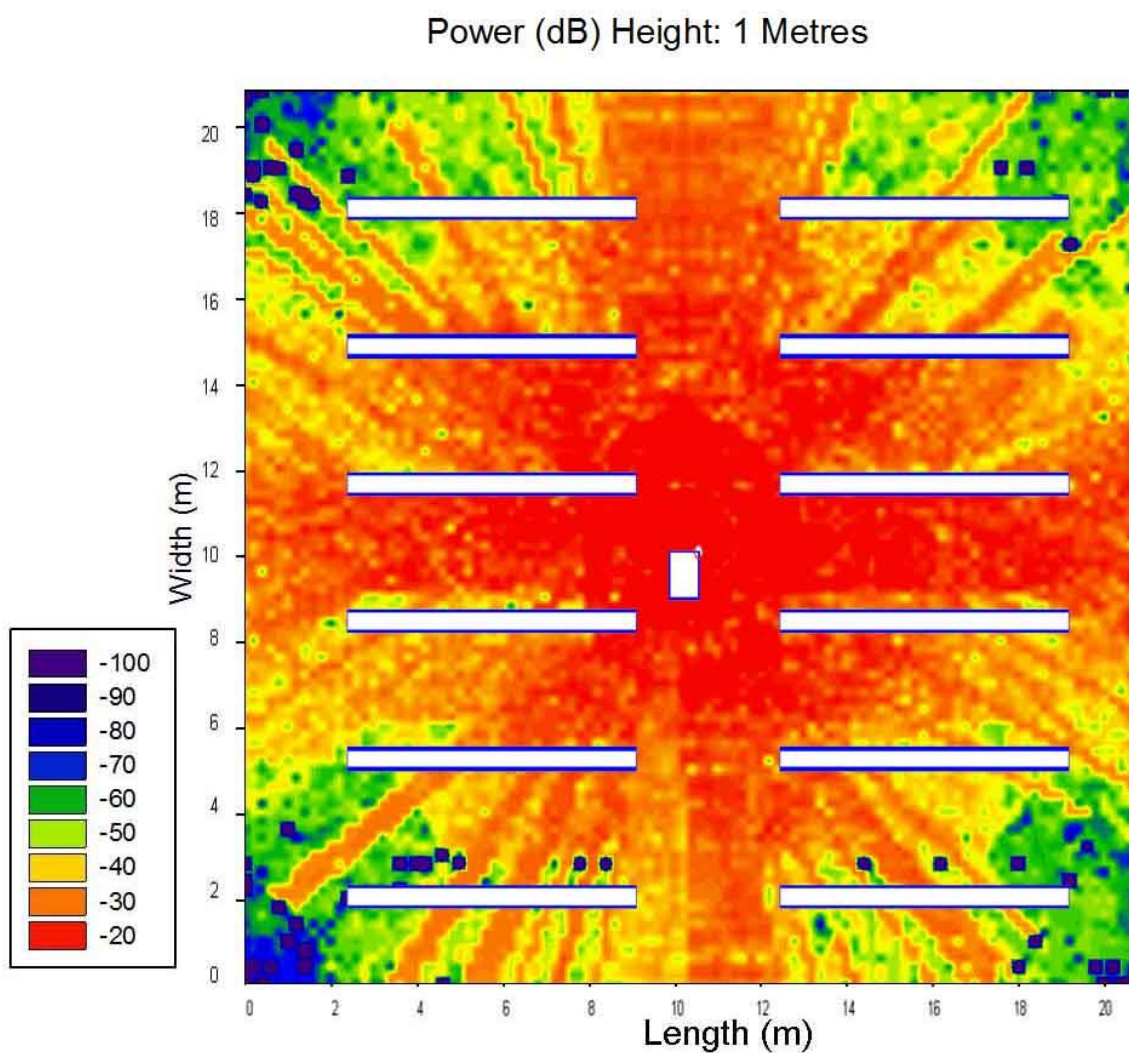
## A.2.3. Escenario Grande 4

Se trata del mismo escenario anterior pero con diferente posición de carro



A.2. 10. Nivel de potencia a 1 metro de altura para (RFID)





A.2. 11. Nivel de potencia a 1 metro de altura para (ZigBee)

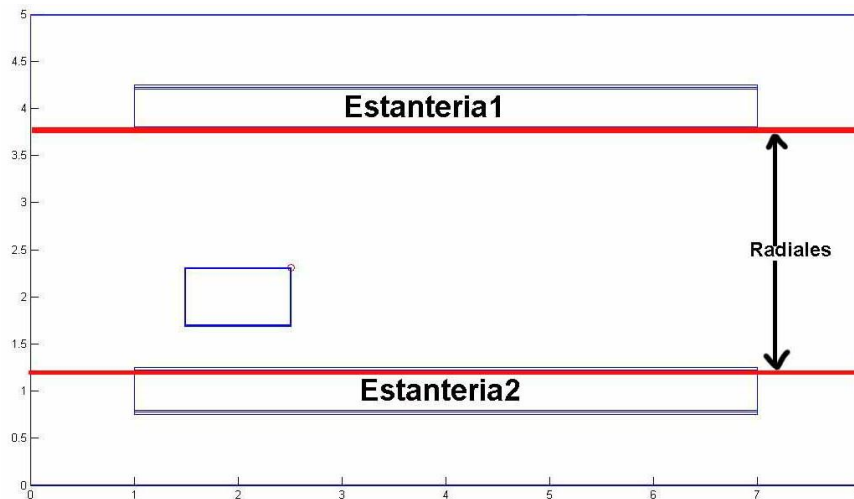
---

## ANEXO 3

# Introducción de elementos en las estanterías (ZigBee)

A continuación se va a analizar el efecto que produce la introducción de objetos de distintos materiales en las estanterías. Estos resultados se compararan con los resultados obtenidos con las estanterías vacías.

Para ver detalladamente como varia el nivel de señal según el tipo de material de los objetos que están en la estantería, se ha creado una serie de radiales. Estas radiales están representadas en la siguiente figura.



A.3. 1. Ubicación de las Radiales

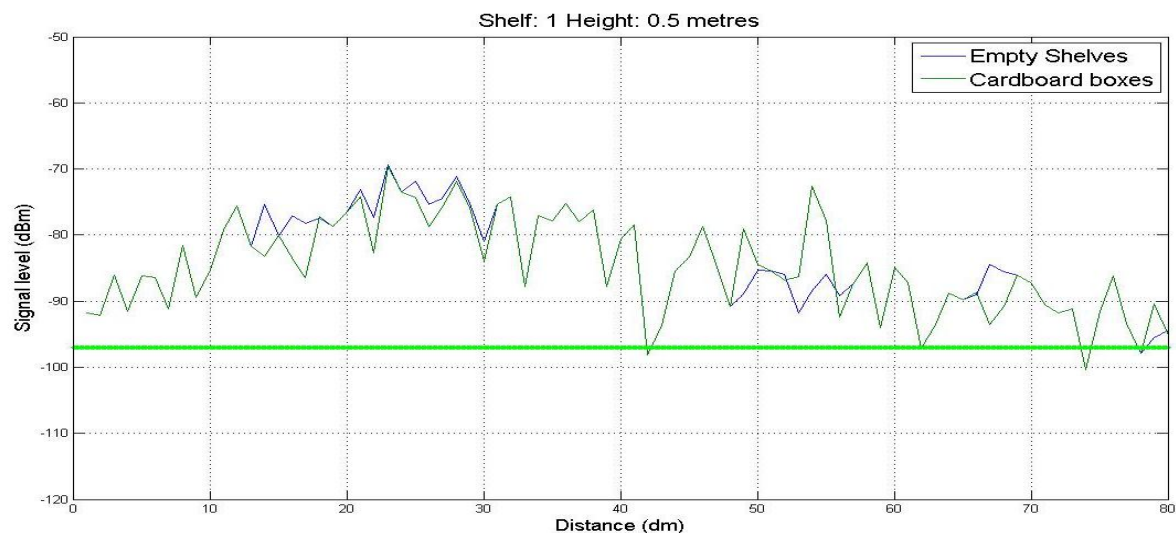
## A.3.1. Objetos de Cartón

Vamos a analizar detalladamente como afecta la presencia de objetos de cartón en las estanterías.

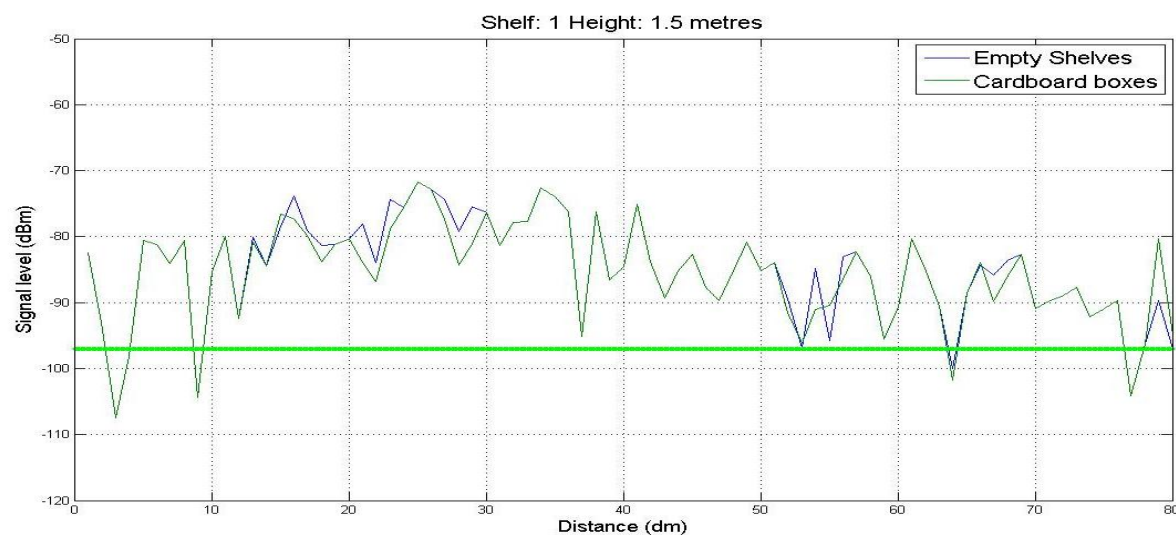
### A.3.1.1. Estantería 1

En la estantería 1, la que esta más alejada del carro, como se puede ver en la figura A.3.1. Hemos realizado dos radiales a las alturas de 0.5 y 1.5 metros.





**A.3. 2. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cartón (verde)**



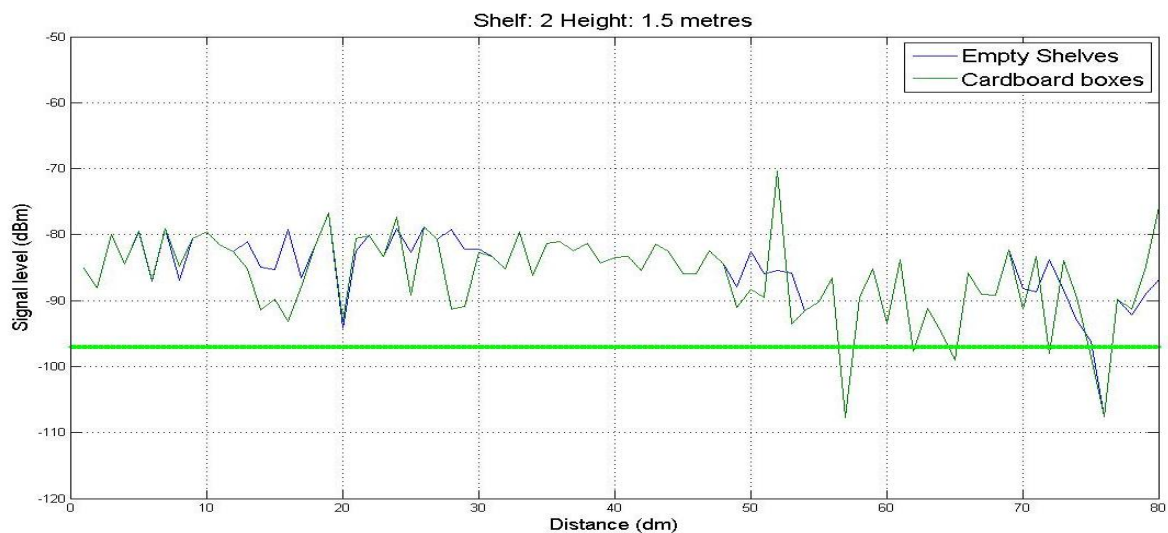
**A.3. 3. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cartón (verde)**

## A.3.1.2. Estantería 2

En la estantería 2, la que está más cerca del carro, como se puede ver en la figura A.3.1. Hemos realizado dos radiales a las alturas de 0.5 y 1.5 metros.



A.3. 4. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 2 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cartón (verde)



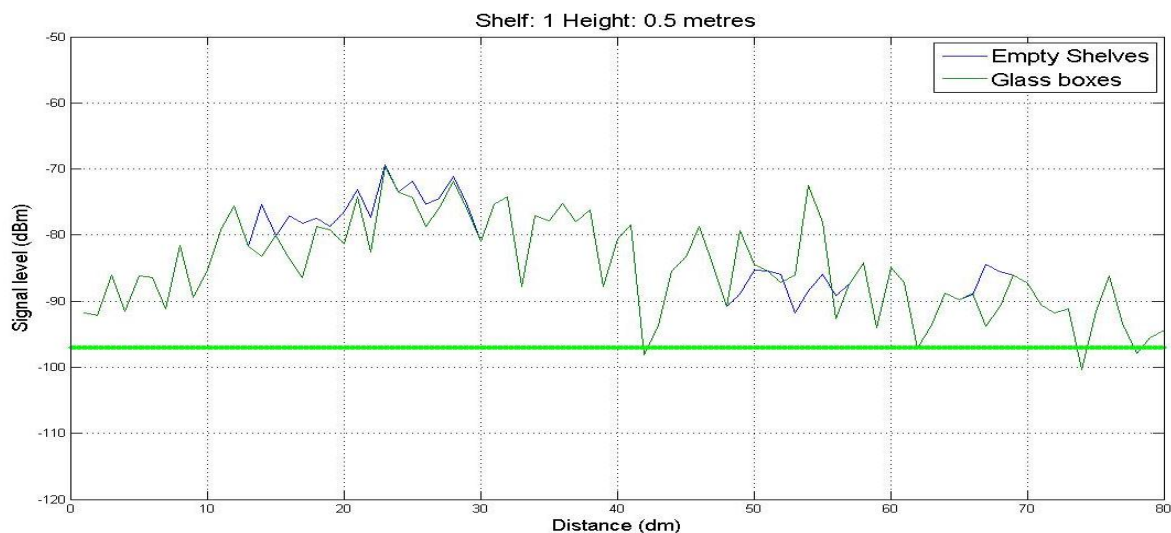
A.3. 5. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 2 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cartón (verde)

## A.3.2. Objetos de Cristal

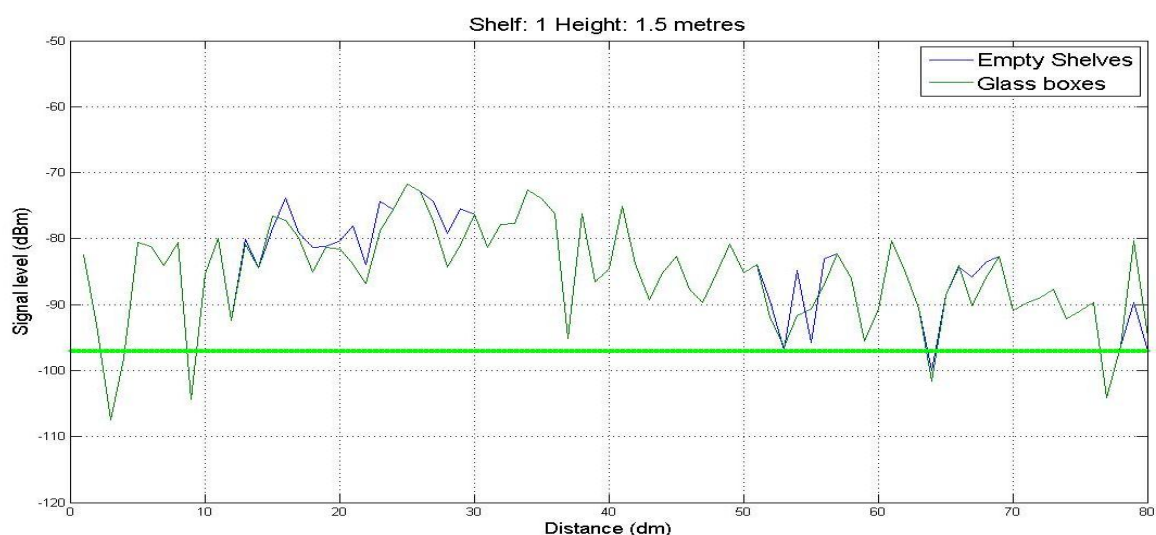
Vamos a analizar detalladamente como afecta la presencia de objetos de cristal en las estanterías.

### A.3.2.1. Estantería 1

En la estantería 1, la que esta más alejada del carro, como se puede ver en la figura A.3.1. Hemos realizado dos radiales a las alturas de 0.5 y 1.5 metros.



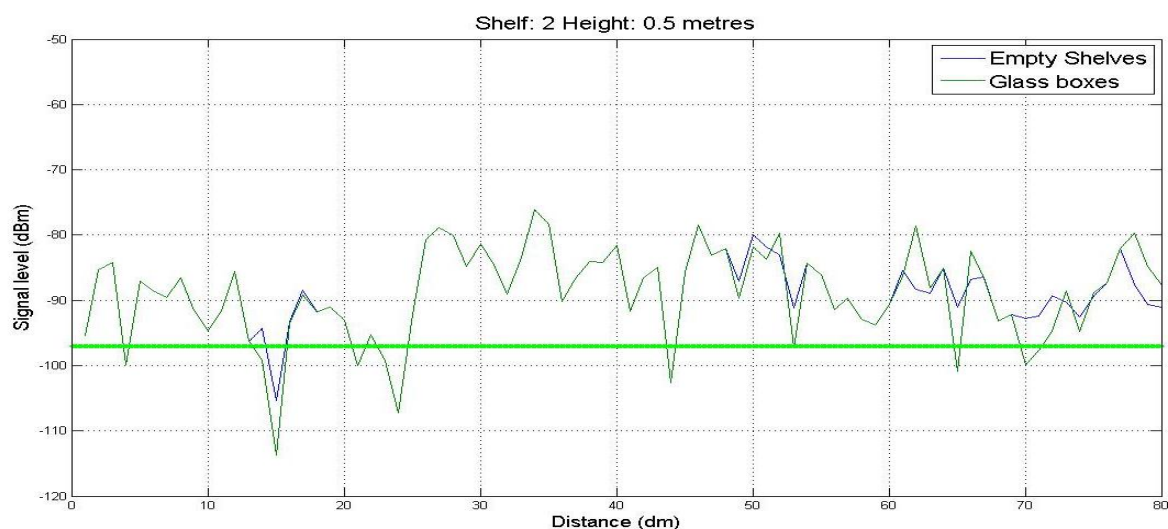
A.3. 6. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cristal (verde)



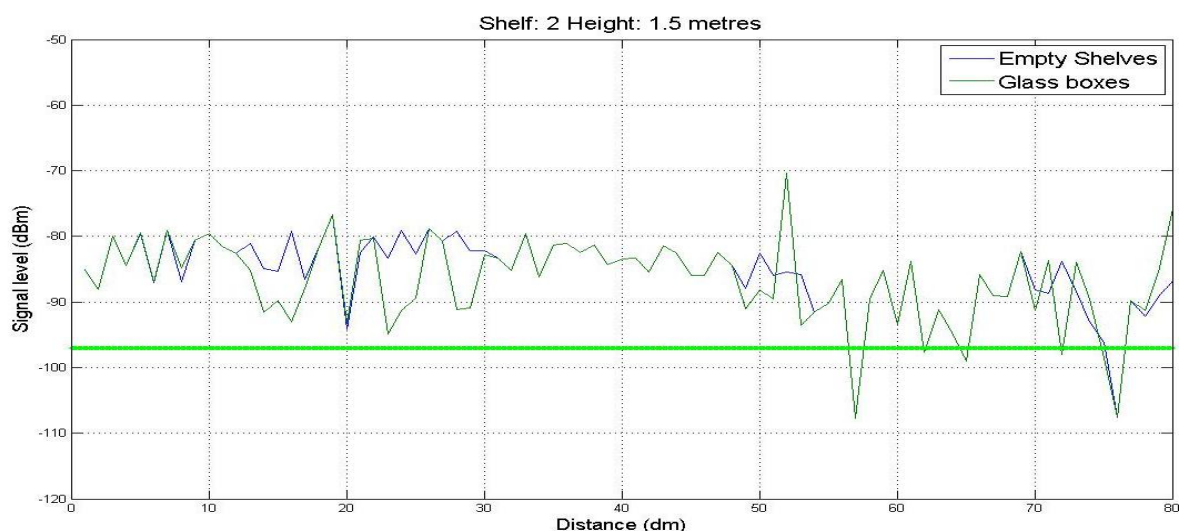
A.3. 7. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cristal (verde)

## A.3.2.2. Estantería 2

En la estantería 2, la que esta más cerca del carro, como se puede ver en la figura A.3.1. Hemos realizado dos radiales a las alturas de 0.5 y 1.5 metros.



A.3. 8. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 2 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cristal (verde)



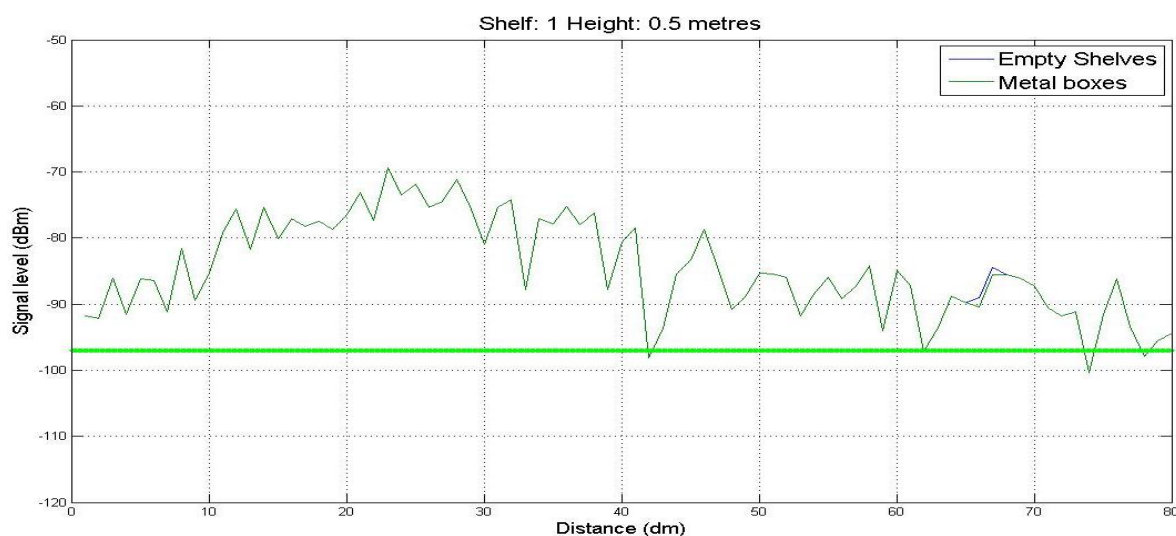
A.3. 9. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 2 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de cristal (verde)

## A.3.3. Objetos de Metal

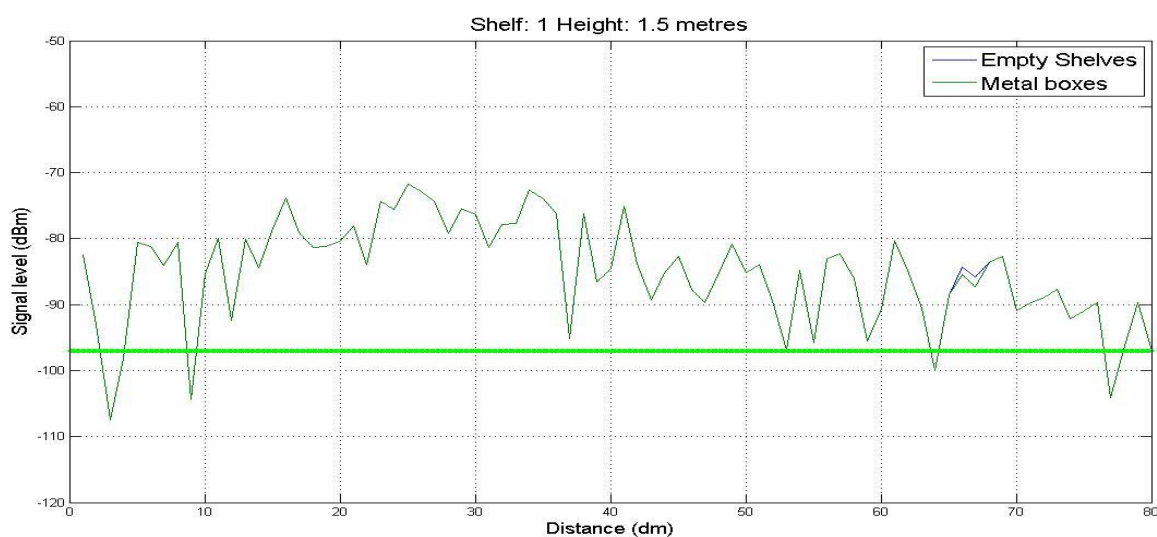
Vamos a analizar detalladamente como afecta la presencia de objetos de metal en las estanterías.

### A.3.3.1. Estantería 1

En la estantería 1, la que esta más alejada del carro, como se puede ver en la figura A.3.1. Hemos realizado dos radiales a las alturas de 0.5 y 1.5 metros.



A.3. 10. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de metal (verde)

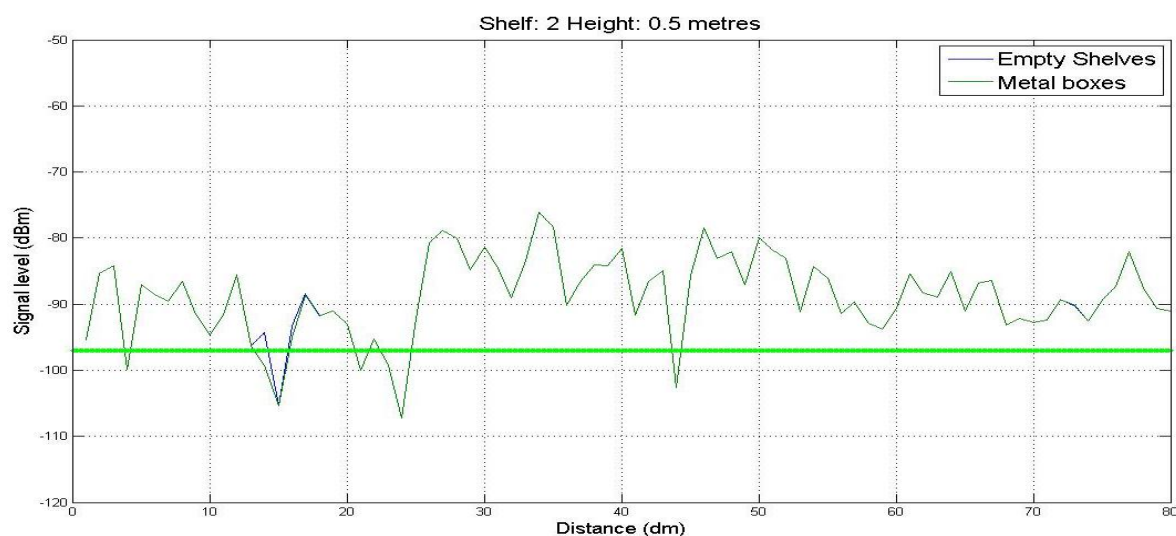


A.3. 11. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de metal (verde)

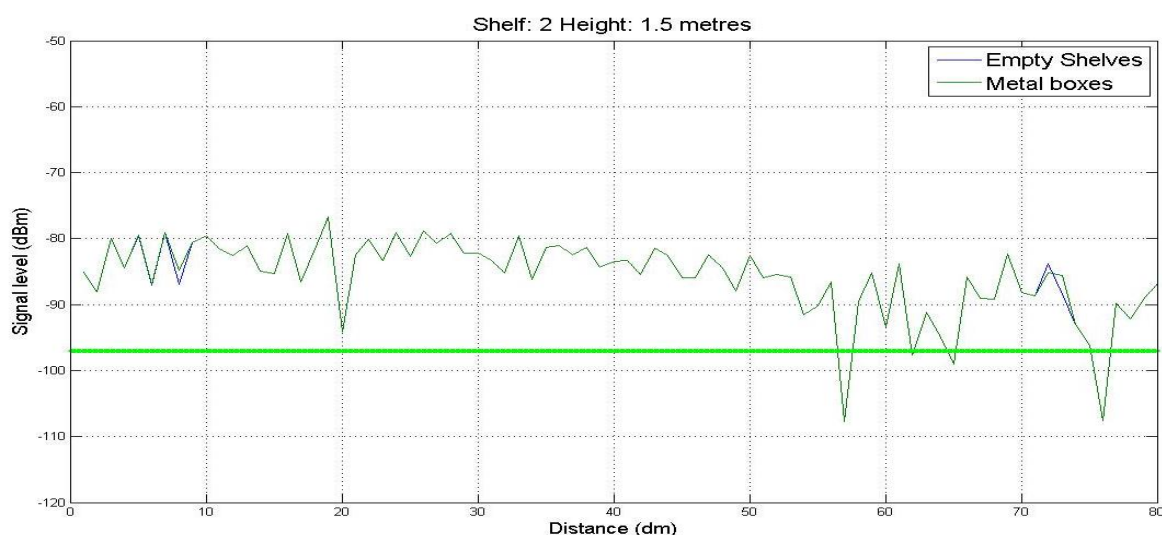
## A.3.3.2 Estantería 2

En la estantería 2, la que esta más cerca del carro, como se puede ver en la figura A.3.1. Hemos realizado dos radiales a las alturas de 0.5 y 1.5 metros.





A.3. 12. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 2 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de metal (verde)



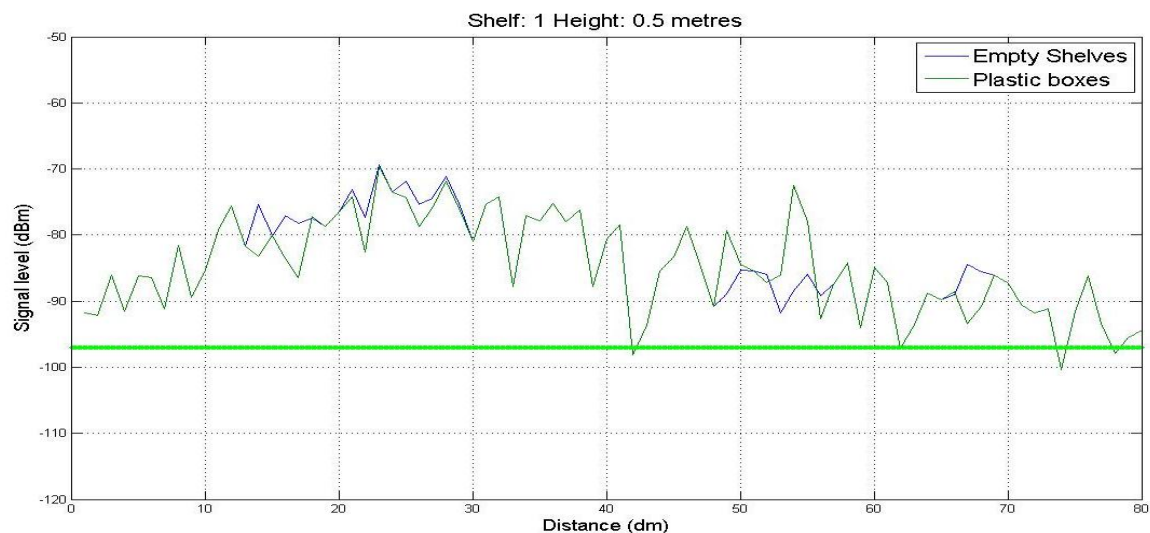
A.3. 13. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 1 para estanterías vacías (azul) y estanterías con objetos de metal (verde)

## A.3.4. Objetos de Plástico

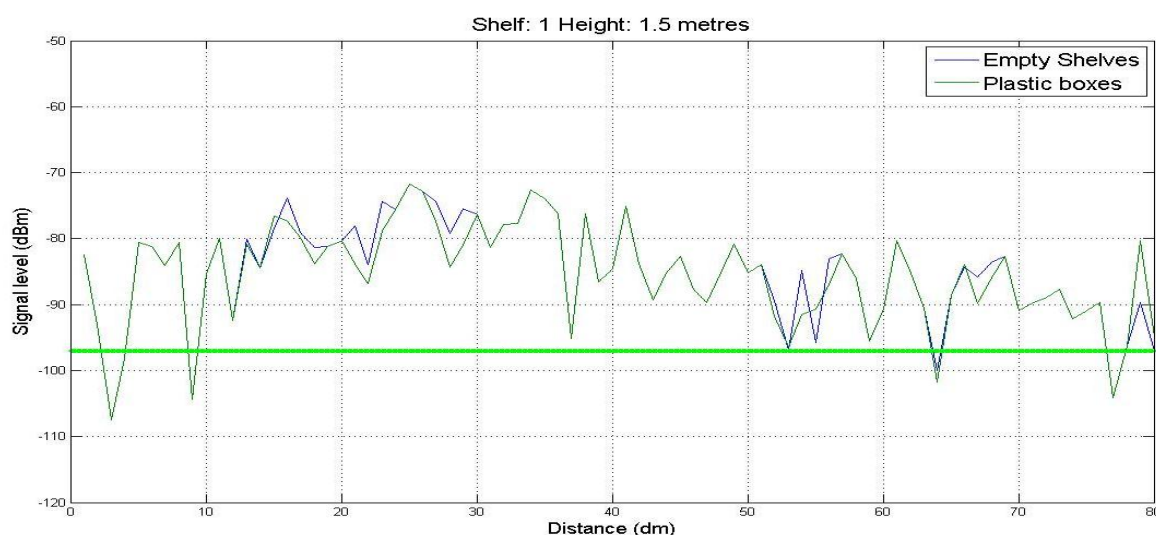
Vamos a analizar detalladamente como afecta la presencia de objetos de plástico en las estanterías.

### A.3.4.1. Estantería 1

En la estantería 1, la que esta más alejada del carro, como se puede ver en la figura A.3.1. Hemos realizado dos radiales a las alturas de 0.5 y 1.5 metros.



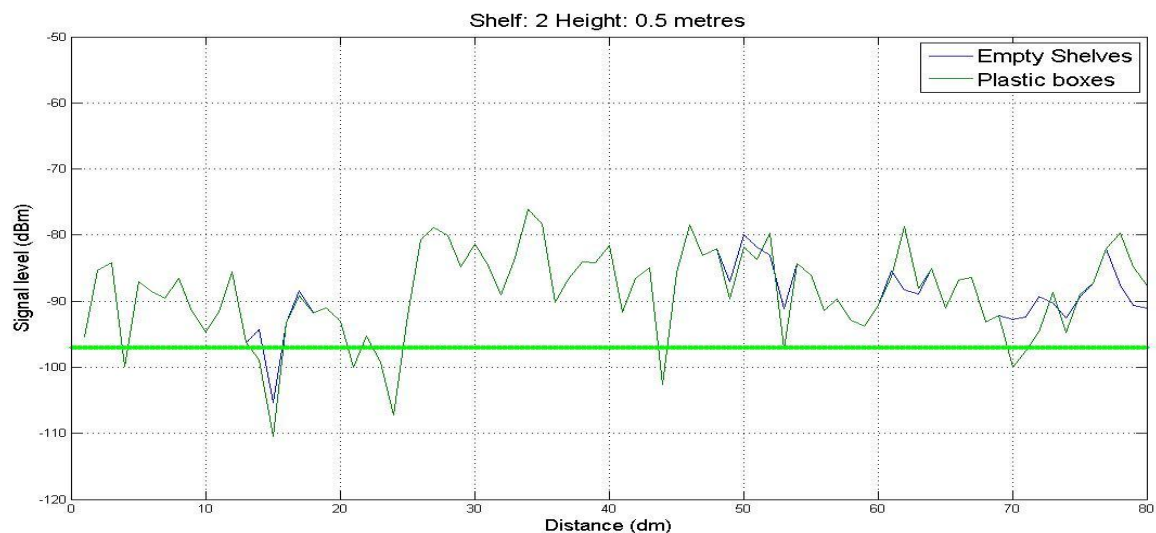
**A.3. 14. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 1 con cajas de plástico utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde)**



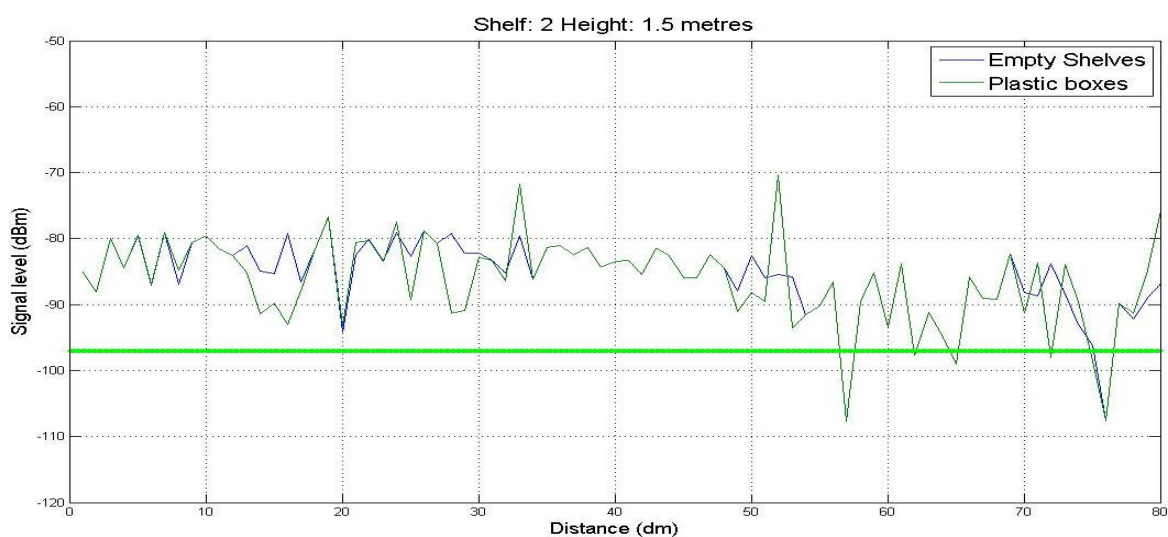
**A.3. 15. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 1 con cajas de plástico utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde)**

## A.3.4.2. Estantería 2

En la estantería 2, la que está más cerca del carro, como se puede ver en la figura A.3.1. Hemos realizado dos radiales a las alturas de 0.5 y 1.5 metros.



A.3. 16. Nivel de señal a 0.5 metros en la estantería 2 con cajas de plástico utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde)



A.3. 17. Nivel de señal a 1.5 metros en la estantería 1 con cajas de plástico utilizado un carro de metal (azul) y un carro de plástico (verde)

# ANEXO 4

## Carro de Metal

Caro de hipermercado con unas dimensiones de 1.020 x 610 x 1.035, con una capacidad de 180 litros.

Acabado zincado brillante. Dotado con 4 ruedas de goma polivalentes de 125mm de diámetro



Referencia	9445
Dimensiones (mm) largo x ancho x alto	1.020 x 610 x 1.035
Ruedas Fijas mm	
Ruedas Giratorias mm	125
Bandaje	Goma
Peso Kg	15
Carga	180



---

# ANEXO 5

## Carro de Plástico

Caro de hipermercado con unas dimensiones de 1.020 x 610 x 1.035, con una capacidad de 180 litros. Permite incorporar cualquier candado monedero standard para diámetro de 25 mm.

Ruedas giratorias, soporte de chapa de acero zincado, rodamiento giratorio de dos hileras de bolas.



Referencia	4945
Dimensiones (mm) largo x ancho x alto	1.020 x 610 x 1.035
Ruedas Fijas mm	
Ruedas Giratorias mm	125
Bandaje	Goma
Peso Kg	12
Carga	180

# ANEXO 6

## Eucap

# Topological Analysis of Performance of Zigbee Systems in Commercial Environments

E. Salinero, L. Azpilicueta, F. Falcone

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica  
Universidad Pública de Navarra  
Pamplona, Spain  
Francisco.falcone@unavarra.es

**Abstract**—In this work, the analysis of the impact of diverse topological configurations as well as different materials in the deployment of a ZigBee wireless network in a commercial surface such as a supermarket is analyzed. Deterministic simulation results are presented with the aid of an in-house 3D ray launching code, clearly stating the topological and morphological dependence of the wireless link. The adoption of precise radioplanning techniques can aid in the deployment of efficient and cost effective wireless solutions applied to commercial logistics in supermarkets.

**Index Terms**—Supermarket, ZigBee, 3D ray launching

## I. INTRODUCTION

In recent years, the use of wireless communications systems has experienced a great growth. Personal Area Networks are becoming a necessary reference in the case of radiofrequency applied in commercial environments due to the large number of devices that are expected to be operating in the near future, as part of the adoption of the Internet of Things (IoT). One of the most widely used standards is 802.15.4 and particularly ZigBee, because it is a very successful technology interconnecting mesh networks with a large number of elements [1-2].

One of the challenges in retail business is to increase distribution efficiency as well as providing a better user experience when shopping. This has led to the adoption of wireless systems [3-4] in order to provide real time logistic analysis as well as added value functionalities, such as in-building guidance or signaling messages towards the customer.

In this paper, the topological dependence of ZigBee sensor configurations in relation to radio propagation in commercial surfaces is analyzed. The goal is to achieve an adequate planning of sensor location to optimize both the level of interference as the consumption of the system. In order to perform radioplanning estimations, a 3D Ray Launching in-house algorithm has been employed.

## II. SIMULATION SCENARIO

The scenario that has been chosen is composed of two sets of commercial shelves and one shopping cart. A layout of the

empty scenario can be seen in Fig. 1 and Fig 2, depicting the distribution of the products in the shelves. The scenario could be a typical hallway of a mall where ZigBee system could be set up. A ZigBee transceiver (represented by a circle in the previous figures) has been placed in the corner of shopping cart at height of 1.035 meter. In order to evaluate the topological dependence of the radio coverage, simulations have been obtained in each point of the complete scenario. The different analysis points are separated 0.1 meters in each direction at the same fixed height of 1.05 m.

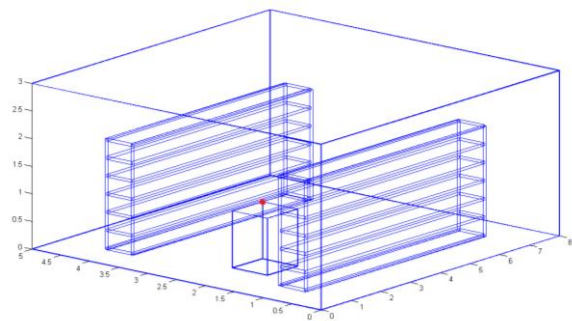


Fig.1: Supermarket simulation scenario, including empty shelves and a shopping cart with a ZigBee transceiver

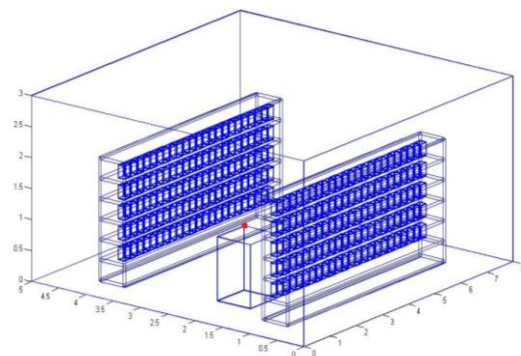


Fig.2: Simulation scenario including merchandise within the shelves.

## III. SIMULATION RESULTS OF THE COMMERCIAL SCENARIO

In order to analyze the behavior of the radio channel within the indoor supermarket scenario, an in-house implemented 3D ray launching algorithm has been employed, coded in Matlab.

The 3D Ray Launching method is a deterministic technique based on launching rays from the transmitter with a discrete angle increment ( $\Delta\phi$ ,  $\Delta\theta$ ) within a defined solid angle. Each ray is computed individually and takes into account typical interactions as reflexions, refractions and a first order of diffraction [5]. The algorithm considers all material properties (loss tangent and dielectric constant) of the objects and walls in the room, which have been included. Fig 3 depicts some results of the estimated coverage obtained with Ray Launching for two different heights for an empty scenario and scenario with cardboard boxes.

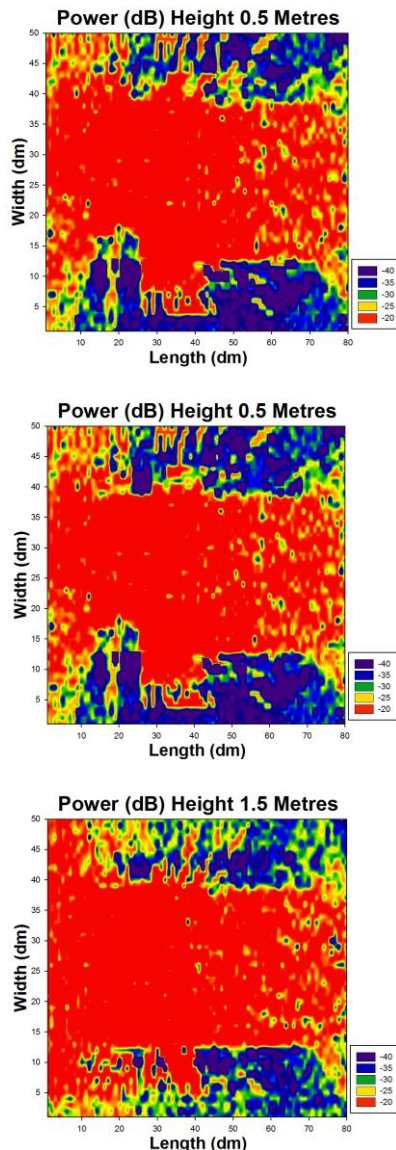


Fig.3: Simulation result of Received Signal Level obtained with 3D RL algorithm at the height of 0.5 (empty shelves, top, and cardboard boxes, middle) and 1.5 metres for empty shelves (bottom figure).

As it can be seen, the inclusion of different material properties modifies the received field values due to

modification in absorption properties. Moreover, due to strong multipath inherent to the indoor scenario, received power levels are modified with changes in observable height (0.5m and 1.5m, respectively). In order to account for the impact of material changes, several simulation results have been obtained for different materials inside the cardboard boxes, as shown in figure 4. Depending on transceiver position and the material under study, changes in the order of 15 dBs can be observed, with a clear impact on overall coverage of the sensor nodes and hence the overall radioplanning design of the final network to deploy.

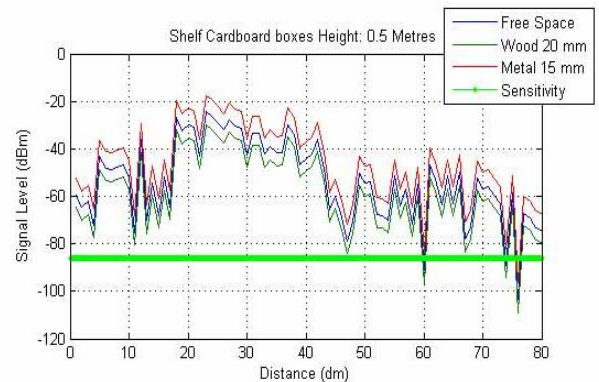


Fig 4: Signal level at one of the shelves at a height of 0.5 meters

#### IV. CONCLUSIONS

Due to the large increase in the use of wireless technologies in indoor scenarios, it is necessary to perform efficient radioplanning in order to decrease power consumption and minimize overall interference. In this work, the evaluation of received power in an indoor ZigBee scenario in a supermarket has been presented with the aid of an in-house 3D Ray Launching code. The results confirm that network performance is closely related to topological characteristics of the scenario. These results are of great interest in the implementation of indoor sensor deployments, which are being currently analyzed for future adoption in commercial surfaces and supermarkets to enhance user experience.

#### REFERENCES

- [1] Yang Xiao, Yi Pan. Emerging Wireless LAN's, Wireless PAN's, and Wireless MAN's, IEEE 802.11, IEEE 802.15, IEEE 802.16, Wireless Standard Family, John Wiley & Sons, 2009
- [2] H. H. Chen, M. Guizani. Next Generation Wireless Systems and Networks, John Wiley, 2006.
- [3] ZigBee Wireless Networks and Transceivers by Shahin Farahani, Foreword by Bob Heile, Chairman of the ZigBee Alliance, Newnes Publications, 2008.
- [4] <http://www.rfidjournal.com/article/view/7753>, Walmart Case Study B. S. Lee, A. R. Nix, J.P. McGeehan, "Indoor Space-Time propagation modelling using a ray launching technique", *Antennas and Propagation*, vol 1, pp. 279-283, April 2001